

Provozní vlastnosti a chránění vodíkových palivových článků

Operational characteristics and protection
of hydrogen fuel cells

Jan Petrov

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá poruchami palivových článků typu PEM a možnostmi jejich efektivního chránění. První část čtenáře seznámí s vodíkovými technologiemi, vlastnostmi vodíku, PEM palivovými články a také nezbytnou teorií. Další část nabídne srovnání palivových článků s fotovoltaickými články a akumulátory. Ve třetí části jsou probrány poruchy, které se mohou vyskytnout během provozu PEM palivových článků spolu s vlivy provozních parametrů na polarizační charakteristiku. V poslední části se práce zabývá způsoby chránění palivových článků a výčtem možných ochran. Je zde také provedena simulace zkratového proudu palivového článku, jenž je součástí laboratoře vodíkových technologií. Na závěr jsou navrženy možnosti chránění palivových článků v laboratoři a jsou shrnuty celkové výsledky této práce.

Klíčová slova

Palivový článek, PEM, zkrat, chránění, laboratoř vodíkových technologií

Abstract

This thesis deals with faults of PEM fuel cells and possibilities of their effective protection. In first part of this diploma thesis hydrogen technologies, properties of hydrogen, PEM fuel cells and also the necessary theory are described. Next part of the thesis offers a comparison between fuel cells, photovoltaic cells and accumulators. The next section discusses faults that may occur during the operation of PEM fuel cells and also the effects of operating parameters on the polarisation curve. In the last part, the diploma thesis deals with ways of protecting fuel cells and various protections. There is also a simulation of short circuit current of the fuel cell, which is part of the hydrogen technology laboratory. Finally, the possibilities of fuel cell protection in the laboratory are proposed and a summary of the results of this thesis is made.

Keywords

Fuel cell, PEM, short circuit, protection, hydrogen technology laboratory

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat zejména vedoucímu této práce prof. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D. a také Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za velmi cenné rady a poznatky poskytnuté během tvorby této diplomové práce. V neposlední řadě patří velké díky mojí rodině za podporu a trpělivost, kterou mi poskytla během doby celého studia.

Zvláštní poděkování patří mému otci, kterému jsem nesmírně vděčný za vše, co pro mě kdy udělal.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1. Vodíkové technologie jako zdroje elektrické energie	11
1.1 Historie palivových článků	11
1.2 Vlastnosti vodíku	12
1.3 Princip činnosti vodíkových palivových článků	13
1.4 Typy vodíkových palivových článků	18
1.5 Palivové články typu PEM	19
1.6 Příprava vodíku pro palivové články a jeho rozdělení podle způsobu výroby	22
1.7 Skladování vodíku	24
1.8 Výhody a nevýhody vodíkových palivových článků	25
2. Srovnání palivových článků s elektrochemickými akumulátory a fotovoltaickými články	27
2.1 Porovnání na základě analogie nádrže s přítokem a odtokem	28
2.2 Fotovoltaické články	29
2.3 Akumulátory	31
2.4 Shrnutí	34
3. Vlastnosti palivových článků PEM	35
3.1 Vliv teploty, tlaku a vlhkosti na VA charakteristiku palivového článku	35
3.1.1 Teplota	35
3.1.2 Tlak	36
3.1.3 Vlhkost	37
3.2 Vliv kapacity palivového článku	38
3.3 Poruchové stavy palivových článků PEM a jejich projevy	39
3.4 Zkrat palivového článku	41
3.4.1 Napěťové poměry během zkratu palivového článku	42
4. Chránění systémů s palivovými články	43
4.1 Popis laboratoře vodíkových technologií	43
4.1.1 Parametry a charakteristiky palivových článků	44
4.1.2 Systémy zajišťující chod palivových článků	50
4.1.3 Rozvaděče v laboratoři a jejich přístrojové vybavení	53

4.2 Simulace průběhu zkratového proudu palivového článku Nedstack FCS 8-XXL	54
4.3 Možnosti ochrany palivových článků	59
4.3.1 Pojistky	59
4.3.2 Jističe	60
4.3.3 CVM - Control Voltage Monitor.....	61
4.3.4 Digitální nadproudové ochrany	62
4.4 Současný způsob ochrany palivových článků v laboratoři	63
4.5 Možné alternativy chránění palivových článků v laboratoři vodíkových technologií	65
Závěr	66
Literatura	67
Příloha A: Soupis přístrojového vybavení rozvaděčů náležících k laboratoři vodíkových technologií	I
Příloha B: Katalogové informace k pojiskám P40U10.....	XIX

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	střídavý proud
AFC	Alkaline Fuel Cell (palivový článek s alkalickým elektrolytem)
AM	Air mass (průzračnost atmosféry)
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
bar	jednotka tlaku (odpovídá přibližně tlaku jedné atmosféry)
CAN	datová sběrnice (Controller Area Network)
cca	přibližně
CCS	Carbon Capture and Storage (Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého)
CCU	Carbon Capture and Utilization (Zachytávání a využití oxidu uhličitého)
CVM	Cell Voltage Monitor (monitor napětí článků)
DC	stejnsměrný proud
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (palivový článek pro přímé zpracování metanolu)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (palivový článek s taveninou alkalických uhličitů)
MEA	Membrane Electrode Assembly (membránové elektrodové uspořádání)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
obr.	obrázek
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (palivový článek s kyselinou fosforečnou)
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (palivový článek s polymerní membránou)
PLC	Programmable logic controller (programovatelný logický automat)
ppm	Parts per million (částic na milion)
resp.	respektive
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (palivový článek s pevným oxidickým elektrolytem)
tab.	tabulka
tzv.	takzvaně
TCO	Technologické centrum Ostrava
VA	voltampérová
VŠB - TUO	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
CO	Oxid uhelnatý
CO₂	Oxid uhličitý
CO₃²⁻	Trioxidový anion
e⁻	Elektron
H⁺	Vodíkový kation
H₂	Vodík
H₂O	Voda
H₂SO₄	Kyselina sírová
H₃PO₄	Kyselina fosforečná
CH₄	Metan
KOH	Hydroxid draselný
LiAlO₂	Aluminát lithný
O₂	Kyslík
O₂⁻	Oxidový anion
OH⁻	Hydroxidový anion
Pb	Olovo
PbO₂	Oxid olovičitý
Y₂O₃	Oxid yttritý
ZrO₂	Oxid zirkoničitý

Seznam obrázků

Obr. 1 – První palivový článek podle W. R. Grovea	11
Obr. 2 – Únik a následné vznícení vodíku (vlevo) a benzínu	12
Obr. 3 – Princip činnosti palivového článku	13
Obr. 4 – Typická VA charakteristika palivového článku	14
Obr. 5 – Aktivační ztráty, ohmické ztráty a koncentrační ztráty	14
Obr. 6 – Výkonová charakteristika palivového článku	15
Obr. 7 – Výkonová křivka palivového článku PEM	15
Obr. 8 – Toky energií u ideálního PEM článku.....	16
Obr. 9 – Schéma PEM palivového článku	19
Obr. 10 – Složení membránového elektrodového uspořádání (MEA)	20
Obr. 11 – Uspořádání palivových článků do palivového modulu	20
Obr. 12 – Možná provedení kanálů v bipolární desce.....	21
Obr. 13 – Podíl na výrobě vodíku	22
Obr. 14 – Schéma PEM elektrolyzéru.....	23
Obr. 15 – Schéma systému parního reformování	24
Obr. 16 – Různé velikosti tlakových láhví.....	24
Obr. 17 – Princip skladování vodíku v hydridech kovů	25
Obr. 18 – Srovnání procesů přeměny energií u palivových článků	26
Obr. 19 – Srovnání akumulátorů s palivovými články	27
Obr. 20 – Porovnání fotovoltaických panelů, palivových článků	28
Obr. 21 – Struktura fotovoltaického článku	29
Obr. 22 – Princip přeměny záření na elektrickou energii.....	29
Obr. 23 – Náhradní schéma fotovoltaického článku	30
Obr. 24 – Voltampérová a výkonová charakteristika	31
Obr. 25 – Zjednodušené schéma olověného akumulátoru	32
Obr. 26 – Průběh napětí olověného akumulátoru při vybíjení v čase.....	33
Obr. 27 – Příklad VA charakteristik pro různé teploty	35
Obr. 28 – Vliv teploty na napětí PEM článku.....	36
Obr. 29 – Vliv tlaku na VA charakteristiku palivového článku.....	36
Obr. 30 – Příklad vlivu vlhkosti na VA charakteristiku	37
Obr. 31 – Rozhraní elektroda – elektrolyt.....	38
Obr. 32 – Náhradní schéma dynamický popis palivového článku.....	38
Obr. 33 – Vliv zaplavené a vysušené membrány.....	40
Obr. 34 – Obecný průběh zkratového proudu palivového článku	41
Obr. 35 – Náhradní schéma palivového článku pro výpočet zkratového průběhu.....	41
Obr. 36 – Příklad průběhu dílčích napětí během zkratu palivového článku	42
Obr. 37 – Blokové schéma propojení palivového článku s ostatními systémy	44
Obr. 38 – Modul palivových článků od firmy Nedstack (pohled ze strany přívodů)	44
Obr. 39 – Změřené charakteristiky palivového článku Nedstack FSC 8 – XXL	45
Obr. 40 – Minimální průtok a spotřeba vodíku pro modul FCS 8-XXL	46
Obr. 41 – Spotřeba kyslíku a vzduchu pro modul FCS 8-XXL.....	48
Obr. 42 – Závislost tepelného výkonu modulu FCS 8-XXL na odebíraném proudu	49
Obr. 43 – Blokové schéma systému chlazení modulu palivových článků	51

Obr. 44 – Pohled na moduly palivových článků ze strany elektrických vývodů.....	52
Obr. 45 – Výchozí schéma pro simulaci.....	54
Obr. 46 – Schéma vytvořené v prostředí Simulink.....	56
Obr. 47 – Výsledné časové průběhy zkratového proudu pro různé velikosti kapacity	56
Obr. 48 – Časové průběhy zkratového proudu vypočtených v tabulkovém procesoru.....	57
Obr. 49 – Průběhy zkratového proudu při změně odporu palivového článku.....	58
Obr. 50 – Vypínací charakteristika jističe Tmax PV - T4N-PV/E.....	60
Obr. 51 – Modul palivových článků v laboratoři s viditelnou interní deskou	61
Obr. 52 – Zařízení DiLiCo CELL VOLTAGE (varianta pro 48 článků)	62
Obr. 53 – Pojistka P40U10S spolu s návěstním kontaktem v rozvaděči	63
Obr. 54 – Schéma jištění palivových článků	63
Obr. 55 – Umístění pojistek a stykačů v rozvaděči.....	64
Obr. 56 – Blokové schéma možného způsobu chránění	65

Seznam tabulek

Tab. 1 – Vybrané vlastnosti vodíku (při 20 °C) ve srovnání s benzínem.....	12
Tab. 2 – Hodnoty entalpií a entropií reaktantů a produktů reakce	16
Tab. 3 – Srovnání jednotlivých typů palivových článků.....	18
Tab. 4 – Srovnání zdrojů elektrické energie založených na principu přímé přeměny	34
Tab. 5 – Dovolené množství znečišťujících látek v přírodním vzduchu	47
Tab. 6 – Seznam rozvaděčů v laboratoři	53
Tab. 7 – Základní parametry pro simulaci	55

Úvod

V současné době se oblast výroby elektrické energie postupně vyvíjí směrem k bezemisním zdrojům, což znamená odklon od tradičních fosilních paliv. Proto je nutné hledat nové šetrné způsoby výroby elektřiny, které budou cenově přijatelné a zároveň budou produkovat akceptovatelné množství emisí, ideálně žádné.

Vodík, který je nutno chápat jako nosič energie, představuje v případě přebytku elektřiny vyráběné z obnovitelných zdrojů možnost její efektivní akumulace ve velkém měřítku. Pomocí přebytečné energie, která by jinak nemusela být využita, se v elektrolyzérech rozloží voda na vodík a kyslík. Takto vyrobený vodík může být poté skladován v libovolně dlouhém časovém horizontu a následně využit například při nedostatku elektrické energie nebo v záložních zdrojích přeměnou v palivových článcích. Jiným způsobem lze získat vodík úpravou vhodných odpadních produktů. Mimo jiné lze zmínit například koksárenský plyn, který vzniká při výrobě koksu v koksovárnách.

Vodíkové technologie se staly v poslední době jedním z hlavních témat současného výzkumu v oblasti energetiky. Vodíkové palivové články je možno použít kromě pohonu dopravních prostředků i jako stacionární záložní zdroje nebo v kogeneračních jednotkách, kdy je spolu s elektrickou energií využíváno i odpadní teplo z palivových článků. Výkony používaných palivových článků se pohybují od jednotek wattů až po řádově megawatty.

Palivové články i přes jisté nevýhody, představují se svou vysokou účinností velice perspektivní zdroje elektrické energie a lze se tedy domnívat, že v budoucnu nastane masivnější nasazování palivových článků jak v oblasti průmyslu, tak i v dopravě. Než ovšem dojde k rozšíření palivových článků, bude nutné vybudovat potřebnou infrastrukturu, která zahrnuje jak výrobu, tak i skladování a distribuci vodíku.

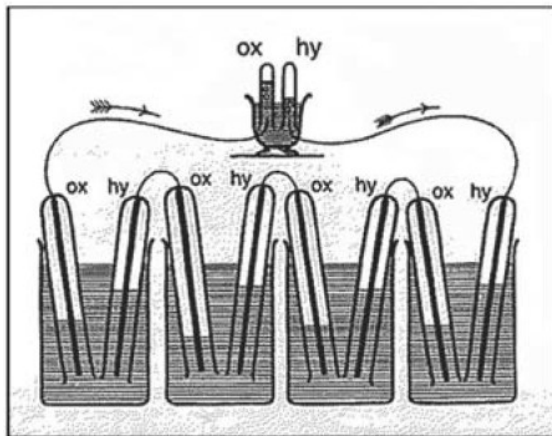
Provoz palivových článků sebou nese, mimo jiné, i nutnost jejich chránění. Jelikož se jedná o značně drahá zařízení, je nutno předcházet jejich poruchám a v případě výskytu poruchy učinit taková opatření, aby nedošlo k poškození samotných palivových článků nebo jejich pomocných zařízení.

Tato diplomová práce se pokouší shrnout vlastnosti palivových článků typu PEM během jejich provozu, vliv provozních parametrů na voltampérovou charakteristiku, vliv zkratu a zejména možné způsoby jejich chránění. V práci se také čtenář seznámí s laboratoří vodíkových technologií, která je provozována v rámci Technologického centra Ostrava.

1. Vodíkové technologie jako zdroje elektrické energie

1.1 Historie palivových článků

První koncept palivového článku sestavil v roce 1839 britský vynálezce William Robert Grove, když zjistil, že lze vyrábět elektřinu inverzním procesem k elektrolýze vody.



Obr. 1 – První palivový článek podle W. R. Grovea [2]

Jeho palivový článek se skládal z platinových elektrod umístěných ve skleněných trubičkách. Tyto trubičky byly ponořeny do roztoku kyseliny sírové, která sloužila jako elektrolyt. V horní, uzavřené části jedné trubičky byl kyslík, ve druhé vodík. Napětí takového článku dosahovalo hodnoty přibližně jednoho voltu. W. R. Grove použil sériové spojení čtyř těchto článků. Takto vytvořená sestava byla připojena k nádobce, ve které probíhala elektrolýza vody, čímž byl indikován průchod proudu. Toto zařízení nebylo ovšem schopno generovat takový výkon, aby našlo použití v praxi.

První velké uplatnění palivových článků nastalo až v 60. letech 20. století při letech do kosmu. V té době NASA s úspěchem aplikovala vodíkové články jako zdroj elektrické energie a pitné vody pro vesmírné moduly Gemini a Apollo, čímž byl dán popud k intenzivnímu vývoji palivových článků. [2]

V současnosti existuje po celém světě mnoho výrobců, kteří nabízejí palivové články pro různé oblasti použití. Aktuálně jsou palivové články nejčastěji aplikovány v oblasti dopravy, ať už se jedná o osobní automobily, autobusy, vlaky nebo třeba vysokozdvizné vozíky. Palivové články jsou ovšem uplatňovány i jako záložní zdroje pro telekomunikační zařízení nebo jako nezávislé zdroje pro nemocnice, kde mohou dodávat kromě elektrické energie i teplo pro vytápění. V takovém případě může jako primární palivo sloužit zemní plyn (metan – CH_4), ze kterého je posléze získán vodík procesem tzv. parního reformování.

S velkou výhodou lze palivové články využít všude tam, kde vzniká vodík jako odpadní produkt, pro který by se nenalezlo jiné využití. Jedná se například o odpadní vodík při výrobě chlóru, nebo koksu.

1.2 Vlastnosti vodíku

Vodík (H_2) je bezbarvý plyn zhruba 14 krát lehčí než vzduch. V plynném skupenství má hustotu pouhých 0,084 kg/m³. Teplota varu vodíku je -253 °C (20 K). Uplatňuje se nejen v chemickém průmyslu nebo jako zdroj energie, ale například pro svou výbornou tepelnou vodivost i pro chlazení velkých generátorů v elektrárnách.

Jádro atomu vodíku ^1H obsahuje pouze jeden proton, což z něj dělá nejjednodušší prvek. Jedná se o nejvíce zastoupený prvek ve vesmíru. Odhaduje se, že 90 % všech atomů ve vesmíru jsou atomy vodíku. V přírodě se ovšem prakticky nevyskytuje samostatně, zato jej lze nalézt v mnoha sloučeninách. Nejvýznamnější část tvoří voda (H_2O), je také obsažen v metanu (CH_4).

Vodík má nejvyšší výhřevnost ze všech běžně dostupných paliv, a to 119 MJ·kg⁻¹, avšak za normálního tlaku má velice malou hustotu energie, proto musí být pro energetické účely uchováván buď pod vysokým tlakem, nebo v kapalném skupenství. V následující tabulce jsou uvedeny některé důležité hodnoty.

Tab. 1 – Vybrané vlastnosti vodíku (při 20 °C) ve srovnání s benzínem [5], upraveno

Palivo	Hustota (kg·m ⁻³)	Měrný objem (l·kg ⁻¹)	Výhřevnost (MJ·kg ⁻¹)	Hustota energie (MJ·l ⁻¹)
H ₂ (1 bar)	0,084	11939	119	0,01
H ₂ (250 bar)	17	58,8	119	2,024
H ₂ (350 bar)	22,2	45,2	119	2,64
H ₂ (700 bar)	39	25,9	119	4,6
H ₂ kapalný (-253 °C)	71,08	14,1	119	8,46
Propan (kapalný)	498	2	46,3	23,08
Benzín (kapalný)	700	1,43	44,5	31,15

Bezpečnost vodíku

Vodík tvoří ve směsi se vzduchem výbušnou směs, a již při nízké koncentraci může nastat výbuch (4 – 75 % hořlavá směs, 19 – 59 % výbušná směs). Pro zažehnutí pak stačí malý výboj s energií okolo 0,02 J.



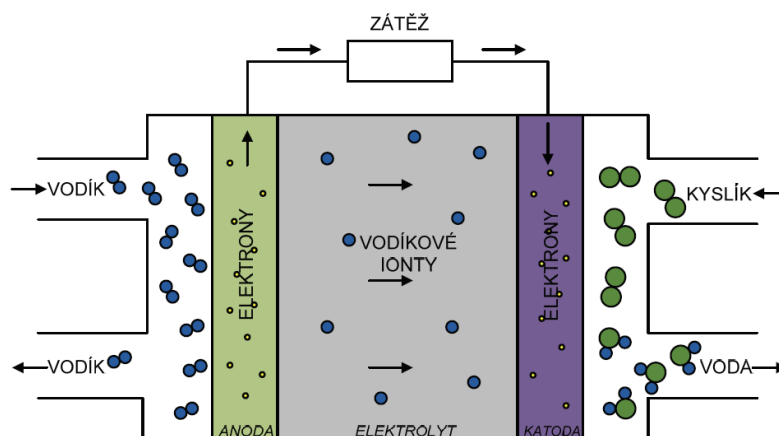
Obr. 2 – Únik a následné vznícení vodíku (vlevo) a benzínu [6]

Při případné destrukci zásobníku stoupá vodík velmi rychle vzhůru, a proto následný požár zasáhne postižené vozidlo v mnohem menší míře než v případě benzínového pohonu (obr. 2).

1.3 Princip činnosti vodíkových palivových článků

V palivovém článku dochází k přímé přeměně chemické energie vázané v palivu na energii elektrickou. Je obvykle složen z pórovitých elektrod oddělených elektrolytem, který umožňuje průchod iontům, ale elektrony nepropouští.

Existuje mnoho různých druhů palivových článků, které se liší především použitými materiály, provozní teplotou případně chemickým dějem probíhajícím na elektrodách. Základní princip je však u všech palivových článků stejný.



Obr. 3 – Princip činnosti palivového článku [1]

Na anodu je přiveden vodík, který na ní oxiduje, přičemž vznikají ionty vodíku (H^+) a elektrony (e^-). Elektrony putují přes anodu a vnější elektrický obvod na katodu, zatímco ionty vodíku putují od anody přes elektrolyt ke katodě. Na katodu je přiváděn kyslík (resp. vzdušný kyslík), který reaguje s ionty vodíku a elektrony, čímž vznikne voda (H_2O).

Zcela zásadní pro správnou funkci palivového článku je materiál elektrod, který musí mít dobrou elektrickou vodivost, vysokou odolnost vůči korozi a také katalytické vlastnosti (usnadnění reakce). Elektrody jsou porézní, což umožňuje průchod paliva a oxidantu až k elektrolytu.

1.3.1 Polarizační charakteristika

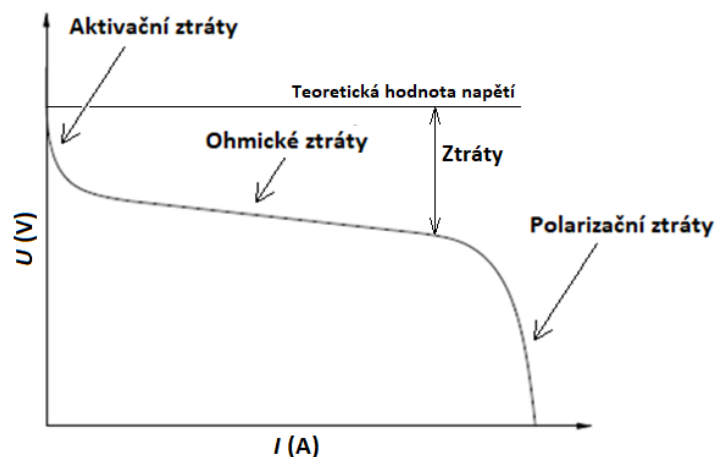
Závislost napětí palivového článku na odebíraném proudu je na obr. 4. Tato křivka je nazývána polarizační charakteristikou (nebo také voltampérovou). Palivový článek dosahuje nejvyššího napětí při stavu naprázdno, s rostoucí zátěží napětí postupně klesá.

Na tvar polarizační charakteristiky mají zásadní vliv ztráty, které vznikají v důsledku chemických a fyzikálních jevů. Všechny níže zmíněné ztráty se projevují úbytkem napětí.

Při postupném zatěžování palivového článku se nejprve projevují aktivační ztráty, které mají logaritmický průběh. Tyto ztráty jsou způsobeny spotřebou energie potřebné pro chemickou reakci.

$$U_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

kde U_{act} jsou aktivační ztráty napětí (V), R je plynová konstanta ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$), α - koeficient prostupu náboje (-), n - počet elektronů na reagující iont (-), F - Faradayova konstanta ($C \cdot mol^{-1}$), i - proud palivového článku (A) a i_0 - výměnný proud (A)



Obr. 4 – Typická VA charakteristika palivového článku, upraveno z [18]

Pro proudy v oblasti středního zatížení palivového článku se nejvíce uplatňují ohmické ztráty, které jsou závislé na mnoha faktorech (pracovní teplota, vlhkost atd.). Tyto ztráty vznikají v důsledku elektrického odporu toku elektronů přes elektrody a jiné vodivé části, ale také vlivem odporu elektrolytu, který vede ionty. Ohmické ztráty mají lineární průběh.

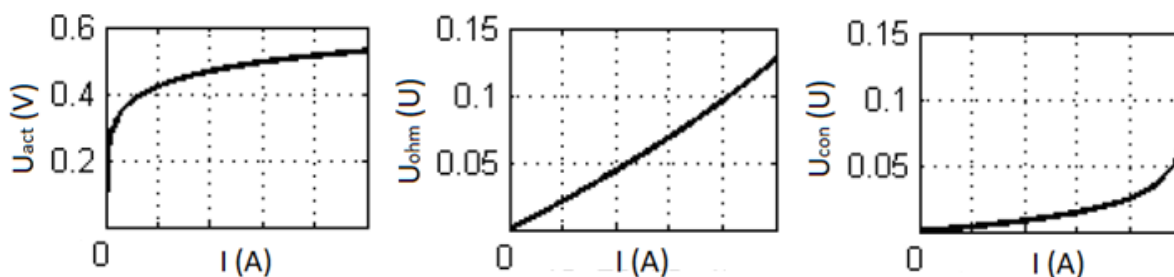
$$U_{ohm} = R_{fc} \cdot i$$

kde U_{ohm} jsou ohmické ztráty napětí (V), R_{fc} - odpor membrány a kontaktů (Ω)

Posledním druhem ztrát jsou koncentrační ztráty, které se začínají uplatňovat až při vysokých proudech. V důsledku vyšší rychlosti spotřeby reaktantů než je rychlost dodávky a také vlivem hromadění produktu reakce (vody) dochází ke zpomalování chemické reakce. Tyto ztráty mají exponenciální průběh a souvisí s kritickou hodnotou přenosu hmoty, proto způsobují omezení maximálního dosažitelného proudu.

$$U_{con} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

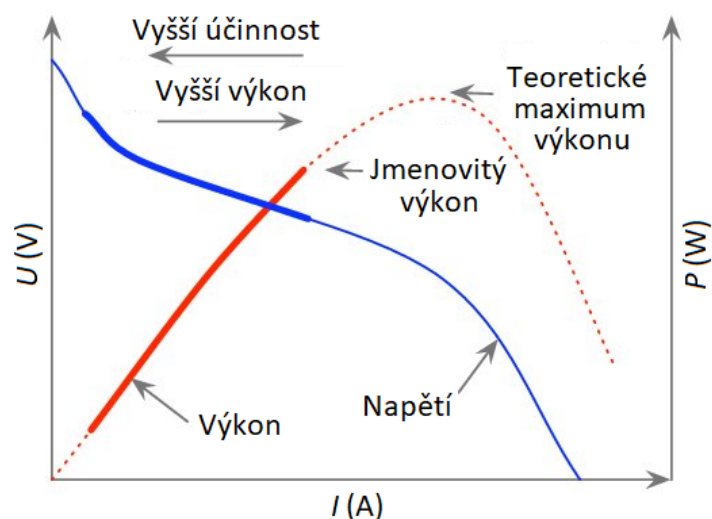
kde U_{con} jsou koncentrační ztráty napětí (V), i_L je limitní proud (A) – je to hodnota proudu kdy jsou všechny reaktanty okamžitě spotřebovány.



Obr. 5 – Aktivace ztráty, ohmické ztráty a koncentrační ztráty v závislosti na proudu palivového článku [1]

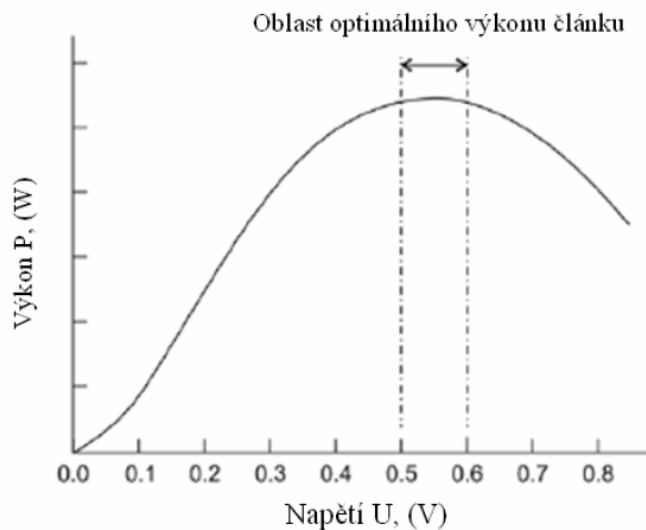
1.3.2 Výkonová křivka

Jelikož je elektrický výkon dán součinem proudu a napětí, lze jej vypočítat v každém bodě polarizační charakteristiky. Z těchto vypočtených hodnot výkonu se pak sestrojí výkonová charakteristika (obr. 6 – červená křivka).



Obr. 6 – Výkonová charakteristika palivového článku, upraveno z[28]

Maximální výkon palivového článku (typu PEM) nastává při velikosti napětí mezi 0,6 - 0,5 V (obr. 7). Největšího výkonu je dosaženo tehdy, je-li vnitřní odpor článku roven odporu vnější zátěže. Při maximálním výkonu palivový článek nepracuje s maximální účinností, vyšší účinnosti je dosahováno při nižších hodnotách zatížení.



Obr. 7 – Výkonová křivka palivového článku PEM [12]

1.3.3 Teorie palivových článků

Množství energie, kterou lze přeměnit na elektrickou energii je dáno Gibbsovou volnou energií:

$$G = H - T \cdot S$$

kde G je Gibbsova volná energie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), H reakční entalpie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), T termodynamická teplota (K), S entropie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ nebo $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Gibbsova volná energie není konstantní, ale mění se s teplotou a se stavem látek účastnících se reakcí. Změnu Gibbsovy volné energie lze vyjádřit:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

kde ΔG je změna Gibbsovy volné energie, ΔH změna entalpie, ΔS změna entropie.

Tuto změnu lze chápat jako rozdíl Gibbsovy volné energie produktů a reaktantů reakce:

$$\Delta G = (H_p - H_r) - T \cdot (S_p - S_r)$$

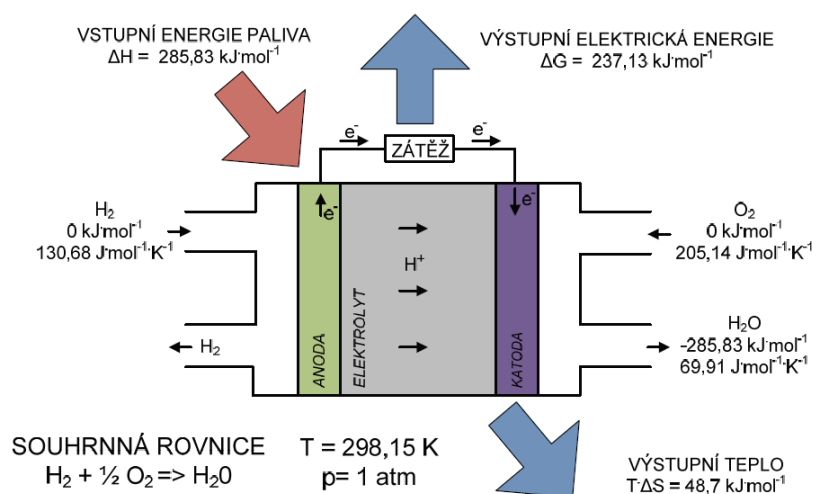
kde H_p je entalpie produktů, H_r entalpie reaktantů, S_p entropie produktů, S_r entropie reaktantů.

V případě palivových článků typu PEM jsou reaktanty vodík a kyslík, produktem pak voda. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty entalpií a entropií látek vstupujících a vystupujících v reakci.

Tab. 2 – Hodnoty entalpií a entropií reaktantů a produktů reakce
při atmosférickém tlaku a teplotě 25 °C

Počet molů dané látky	1 H ₂	0,5 O ₂	1 H ₂ O
Entalpie (kJ·mol ⁻¹)	0	0	-285,83
Entropie (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	130,68	102,57	69,91

Z údajů v tabulce lze stanovit: $\Delta H = -285,83 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\Delta S = -163,34 \cdot 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a tedy změna Gibbsovy volné energie $\Delta G = -237,13 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou využity na obr. 8.



Obr. 8 – Toky energií u ideálního PEM článku [1]

Teoretická elektrická účinnost palivového článku je zhruba 83 %. Je dána poměrem změny Gibbsovy volné energie a energie uchované v palivu (změna entalpie):

$$\eta_{teor} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100$$

kde η_{teor} je teoretická účinnost palivového článku (%).

Teoreticky dosažitelné napětí na svorkách palivového článku z jednoho molu vodíku dosahuje přibližné hodnoty 1,229 V, přičemž k jeho stanovení byl použit vztah:

$$U_{teor} = \frac{\Delta G}{n \cdot F}$$

kde U_{teor} je teoretické napětí (V), F značí Faradayovu konstantu ($C \cdot mol^{-1}$).

Nutno poznamenat, že teoretická účinnost a napětí palivového článku jsou stanoveny při konstantní teplotě a tlaku. Během reálného provozu se mění jak teplota či tlak, ale i koncentrace reakčních plynů a jiné parametry. Proto pro různé parametry vycházejí různé účinnosti a napětí.

Reálná účinnost palivového článku se pak stanoví z poměru skutečného a teoretického napětí:

$$\eta = \eta_{teor} \cdot \frac{U}{U_{teor}}$$

kde η je skutečná účinnost palivového článku (%), U skutečné napětí palivového článku (V).

Pomocí Nerstovy rovnice lze vyjádřit napětí naprázdno palivového článku, ta vyjadřuje napětí naprázdno jako funkci parciálních tlaků reaktantů a teploty:

$$E_{Nerst} = N_0 \cdot \left[E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \right]$$

kde E_{Nerst} je Nerstovo napětí (V), N_0 počet článků v sérii (-), E_0 referenční napětí při standardních podmínkách (V), R plynová konstanta ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$), p_{H_2} parciální tlak vodíku (atm), p_{O_2} parciální tlak kyslíku (atm), p_{H_2O} parciální tlak vody (atm). [1]

1.4 Typy vodíkových palivových článků

V současnosti existuje několik základních typů palivových článků lišících se druhem použitého elektrolytu a provozní teplotou.

Podle typu elektrolytu se palivové články dělí na:

- Články s alkalickým elektrolytem (AFC – Alkaline Fuel Cell) – elektrolytem je hydroxid draselný (KOH)
- Články s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell nebo také Proton Exchange Membrane Fuel Cell) – elektrolyt tvoří katexová iontoměničová membrána
- Články s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell) – H_3PO_4
- Články s taveninou z alkalických uhličitů – (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell) – keramika z LiAlO_2 nasycená alkalickými uhličitany
- Články s pevným oxidickým elektrolytem (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell) – Y_2O_3 nebo ZrO_2

Podle provozní teploty se palivové články dělí na:

- Nízkoteplotní (60 - 130 °C)
- Středněteplotní (160 – 220 °C)
- Vysokoteplotní (600 – 1050 °C)

Tab. 3 – Srovnání jednotlivých typů palivových článků, upraveno podle [3]

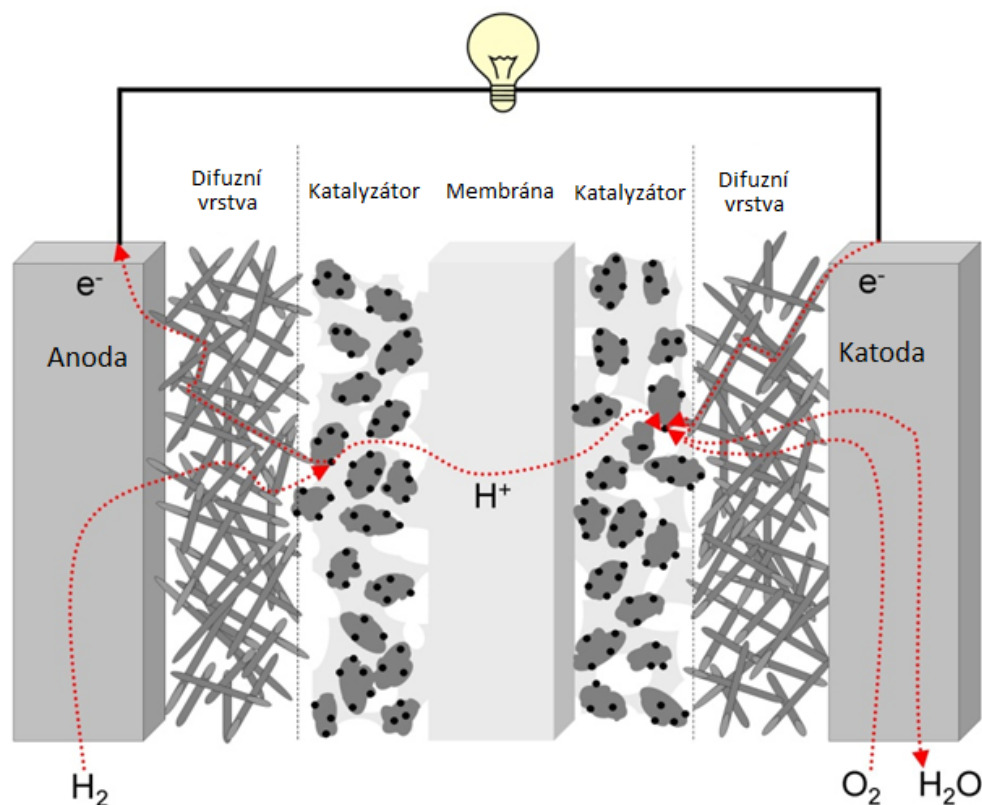
	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Polymerní membrána	Tekutý H_3PO_4	Tekutý KOH	Roztavené uhličitany	Keramický Y_2O_3 nebo ZrO_2
Nosič náboje	H^+	H^+	OH^-	CO_3^{2-}	O^{2-}
Pracovní teplota	80 °C	200 °C	60-220 °C	650 °C	600 – 1000 °C
Katalyzátor	Platina	Platina	Platina	Nikl	Perovskit
Složení článku	Uhlík	Uhlík	Uhlík	Korozivzdorné materiály	Keramika
Palivo	H_2 , metanol	H_2	H_2	H_2 , CH_4	H_2 , CH_4 , CO

Zvláštní skupinu palivových článků tvoří DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), u kterých jako palivo slouží metanol. Tyto palivové články vycházejí z článků PEM, avšak pracují přímo s metanolem bez předchozí reformace. Použití metanolu jako paliva sebou přináší výhody jako například jeho snadné skladování a vyšší energetickou hustotu, ale zároveň oxidace metanolu je pomalejší než u vodíku a během reakce vzniká oxid uhličitý.

Všechny zmíněné typy palivových článků mají shodný základní princip, liší se zejména provozní teplotou, použitým palivem a také provozními charakteristikami. V následující části bude věnován prostor pouze palivovým článkům typu PEM, které mají v současné době nejširší oblast použití.

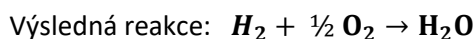
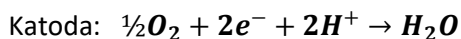
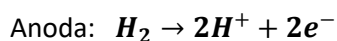
1.5 Palivové články typu PEM

Palivové články typu PEM jsou nejrozšířenějším druhem palivových článků. Jako palivo pro ně slouží vodík (H_2), jako oxidant kyslík (O_2), respektive vzdušný kyslík. Teoretické napětí PEM palivového článku dosahuje zhruba 1,2 V, avšak při zátěži je výstupní napětí nižší zejména o ohmické ztráty a ztráty polarizací.



Obr. 9 – Schéma PEM palivového článku [15]

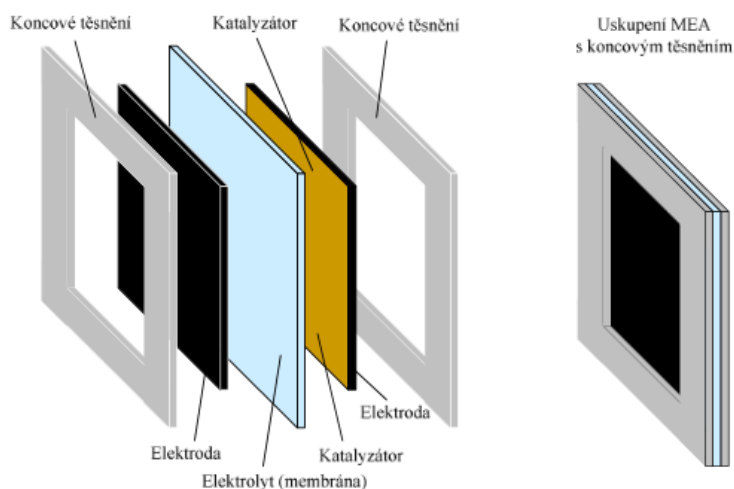
Chemické reakce probíhající v palivovém článku PEM jsou následující:



Palivové články PEM dosahují nejvyšší výkonové hustoty ze všech současných druhů palivových článků. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí $500 - 2500 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

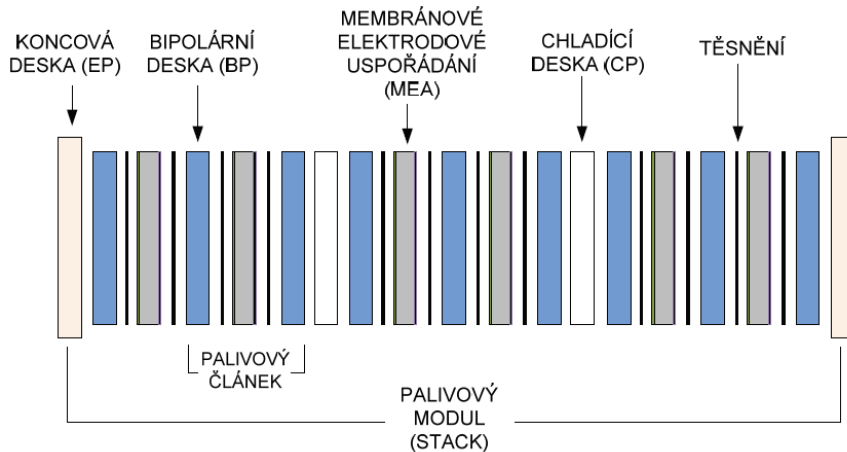
Základní částí palivového článku je polymerní membrána o tloušťce zhruba $20 - 200 \mu\text{m}$, na jejíchž obou stranách je nanесena tenká porézní vrstva platiny, která slouží jako katalyzátor při chemické reakci, a porézní vrstva uhlíku, sloužící jako elektroda. Tato struktura elektroda – katalyzátor – membrána – katalyzátor – elektroda je nazývána membránovým elektrodovým uspořádáním (MEA – Membrane Electrode Assembly). Tloušťka celé této sestavy nepřesahuje 1 mm.

Membrána musí být neustále hydratovaná kvůli své elektrické vodivosti. Z tohoto důvodu je maximální provozní teplota PEM článků limitována hodnotou zhruba 90 °C, při vyšší teplotě by docházelo k nadměrnému odpařování vody. [2]



Obr. 10 – Složení membránového elektrodového uspořádání (MEA) [14]

Palivový modul (stack) je složen ze sériového spojení mnoha (několik desítek) dílčích palivových článků z důvodu dosažení vyššího výstupního napětí. Počet sériových článků se liší dle požadovaného výstupního napětí. Nutno zmínit, že pojmem palivový článek se obvykle označuje celý soubor jednotlivých palivových článků.



Obr. 11 – Uspořádání palivových článků do palivového modulu [1]

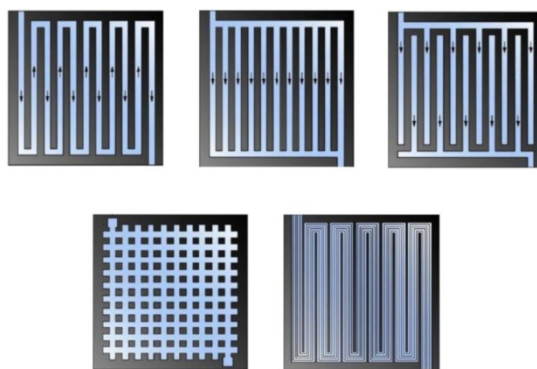
Samotný článek se skládá z membránového uspořádání (MEA) vloženého mezi dvě bipolární desky. V bipolární desce jsou vytvořeny plynové kanály, kterými jsou palivo a oxidant přiváděny do palivového článku. Plynové kanály mají obvykle tvar serpentin, ale mohou být i jiného tvaru. Obvykle se bipolární desky vyrábějí z grafitu, a to z důvodu dobré elektrické vodivosti spolu s vysokou odolností vůči korozi.

Elektrody jsou vyrobeny z uhlíkatých vláken, které umožňují průnik plynům a zároveň poskytují reakční povrch v místě styku s elektrolytem. Elektrody musí být vodivé pro elektrony a také dostatečně tenké pro maximalizaci množství dopravovaného plynu. Katalyzátor je přidáván ze strany elektrolytu na povrch každé z elektrod, aby byla podpořena rychlost chemické reakce. Katalyzátor

nesmí být během reakce spotřebováván, proto se používá platina. Ta je velmi drahá, zato má však vynikající vlastnosti.

Elektrolyt v PEM palivových článcích tvoří tuhá membrána, jejíž materiál je tvořen z fluorem dotovaných sířičitanových kyselin. Jako příklad membrány lze uvést materiál s obchodním názvem Nafion. Pro vodivost vodíkových iontů jsou zapotřebí molekuly vody. Při poklesu množství vody roste rezistivita, což může vést až k poškození membrány. Membrána musí být kromě vodivosti protonů zároveň nevodivá pro elektrony.

Bipolární desky mají za úkol rozvádět palivo a okysličovadlo po obou stranách membrány, což je zajištěno kanálky, které zajišťují kontakt plynu s membránou. Obvykle bipolární desky zajišťují i funkci chladičích desek, proto musí být vhodně řešeno těsnění, aby nedošlo k promíchání chladicí tekutiny s reakčními plyny. [12]



Obr. 12 – Možná provedení kanálů v bipolární desce [4]

Výhody PEM článků oproti jiným druhům jsou zejména:

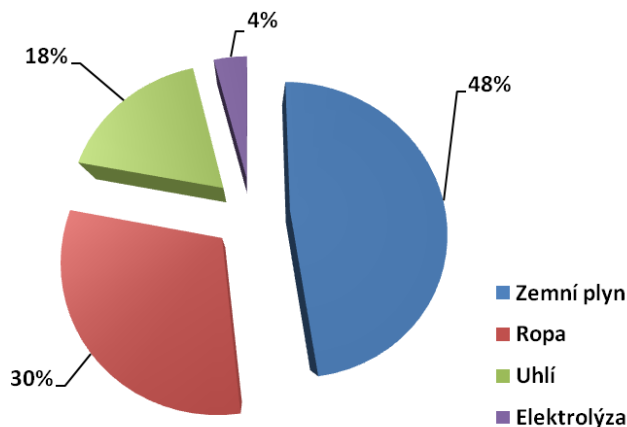
- Vysoká výkonová hustota
- Rychlý náběh a dobrá provozní dynamika
- Nízká provozní teplota umožňující aplikaci v širokém spektru oblastí
- Vysoké napětí článků
- Kompaktní rozměry

PEM články mají ovšem i nevýhody, kterými jsou:

- Použití drahé platiny jako katalyzátoru
- Vysoká cena polymerní membrány
- Špatná tolerance na zbytkový oxid uhelnatý (CO) a síru v palivu
- Nutnost zvlhčování membrány vodou, čímž je limitována maximální provozní teplota palivového článku, a tím je částečně omezeno použití v oblasti kogenerace

1.6 Příprava vodíku pro palivové články a jeho rozdělení podle způsobu výroby

Vodík lze průmyslově získat několika způsoby. Největší část vodíku je vyráběna parním reformováním (reformingem) zemního plynu (metanu) nebo ropných frakcí. Část vodíku je získávána jako vedlejší produkt při výrobě chlóru, vodík je také součástí koksárenského plynu a v menší míře i plynu vysokopečního. Elektrolýza vody je využívána většinou tehdy, pokud je k dispozici přebytek levné elektrické energie.



Obr. 13 – Podíl na výrobě vodíku [16]

Podle způsobu výroby se vodík rozděluje neformálně do tří hlavních kategorií, a to na šedý, modrý a zelený.

- **Šedý vodík**

V současnosti tvoří zhruba 96 % objemu vyráběného vodíku. Tento vodík je vyráběn z fosilních paliv procesy, kterými jsou například parní reformování metanu nebo zplyňování uhlí. Při těchto metodách vznikají velké emise CO_2 , ale za to má tento druh vodíku nízké výrobní náklady.

- **Modrý vodík**

Je obdoba šedého vodíku s tím rozdílem, že vznikající emise CO_2 jsou zachytávány a ukládány prostřednictvím procesu CCS (Carbon Capture and Storage) nebo CCU (Carbon Capture and Utilization). Nejčastěji je modrý vodík vyráběn parním reformingem zemního plynu, vzniklý oxid uhličitý je poté ukládán například do vytěžených ropných ložisek. Tato metoda výroby vodíku je proto značně nákladná.

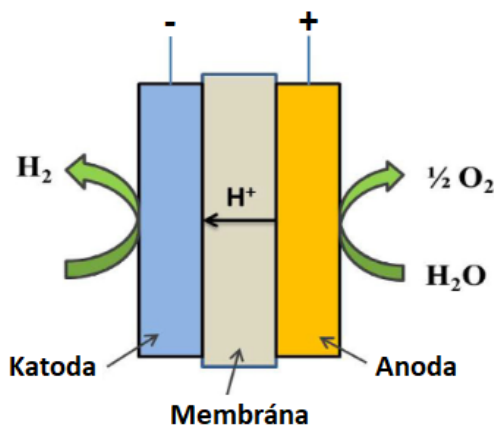
- **Zelený vodík**

Při výrobě zeleného vodíku vznikají malé nebo téměř žádné emise s využitím čistých zdrojů energie jako například větrné nebo fotovoltaické elektrárny. Většinou se zelený vodík vyrábí elektrolýzou vody, což sebou přináší větší náklady. Aktuálně je procentní zastoupení zeleného vodíku ve výrobě velmi malé, dosahuje pouze několik málo procent, ale v dohledné době by se mohlo toto číslo postupně zvětšovat.

Mezi další druhy vodíku patří například tyrkysový vodík, ten je získáván pyrolýzou zemního plynu. Dalšími druhy pak jsou nachový vodík, růžový, hnědý či černý vodík. [7]

1.6.1 Elektrolýza vody

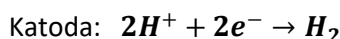
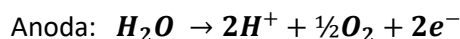
Elektrolýza je proces, kdy při průchodu stejnosměrného proudu vodným roztokem dochází k rozkladu vody na vodík a kyslík. Účinnost vlastní elektrolýzy je dosti vysoká a může dosahovat hodnoty až 92 %, ovšem k samotné elektrolýze je zapotřebí spoustu pomocných zařízení, jako jsou například čerpadla a jiné nezbytné systémy pro chod elektrolýzérů. Proto se celková účinnost procesu může pohybovat jenom okolo 30 %. Z toho důvodu má tato metoda výroby v současnosti velmi malé zastoupení. Výhodou elektrolýzy je ovšem fakt, že k výrobě vysoce čistého vodíku je potřeba pouze zdroj (demineralizované) vody a elektrické energie.



Obr. 14 – Schéma PEM elektrolýzérů [19]

Elektrolýzér typu PEM má podobnou konstrukci jako palivový článek PEM, avšak dochází v něm k opačnému chemickému ději než u palivových článků. Elektrická energie je v elektrolýzérů přeměněna na energii chemickou, která je vázána v produktech elektrolýzy.

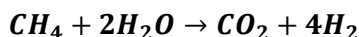
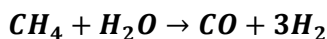
Chemické reakce probíhající v PEM elektrolýzérů jsou:



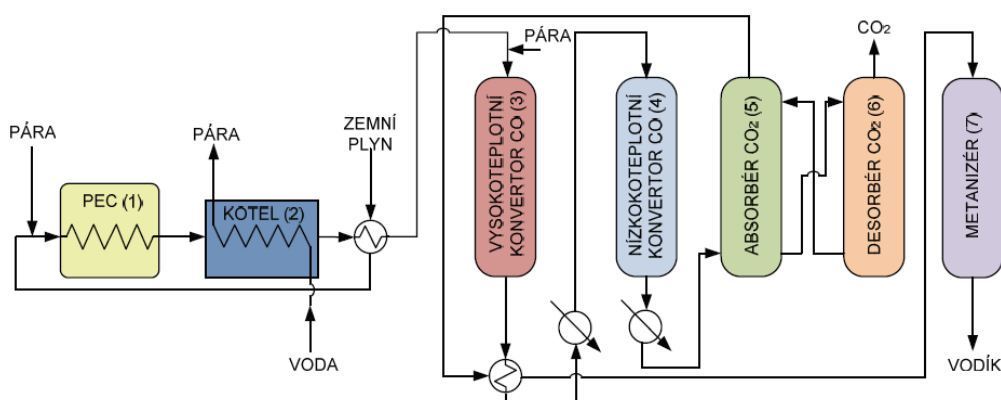
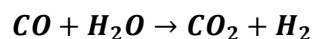
1.6.2 Parní reformování

Parní reformování představuje nejlevnější způsob získávání vodíku. Nejčastěji reformovaným palivem je zemní plyn, který je složen především z metanu (CH_4), ale může být použit i zkapalněný ropný plyn nebo i nafta.

Během procesu parního reformování metan reaguje s vodní párou za relativně vysokých teplot a tlaků (teplota až 800°C , tlak 3 – 5 MPa), přičemž vzniká oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodík.



Reakční produkty jsou poté vedeny dále do konvertorů, kde se oxid uhelnatý přemění na oxid uhličitý spolu s vodíkem. [1]



Obr. 15 – Schéma systému parního reformování [1]

1.7 Skladování vodíku

Vodík lze skladovat více způsoby. Jedná se buď o skladování v plynném stavu v tlakových nádobách, nebo v kapalně fázi za kryogenních teplot. Další možností je skladování chemicky vázaného vodíku v tzv. metalhydridech (hydridech kovů).

Nízká hustota vodíku má za následek malou objemovou hustotu energie, proto nádoby na vodík mají obvykle větší objem pro stejné množství uskladněné energie, než je tomu u jiných paliv. Ovšem toto neplatí pro poměr energie k hmotnosti vodíku, ten má vodík nejvyšší. Vzhledem k hmotnosti tlakových nádob je tato výhoda upozaděna.

1.7.1 Tlakové láhve

Nejčastějším způsobem uchování vodíku jsou tlakové láhve, které mohou být buď kovové, anebo z kompozitních materiálů. Typický tlak vodíku je 350 bar, v novějších aplikacích je to až 700 bar. Pro stlačení vodíku se používají pístové kompresory, potřebná energie pro stlačení na 350 bar dosahuje až 30 % energie uskladněné v palivu. [21]



Obr. 16 – Různé velikosti tlakových láhví [23]

1.7.2 Kryogenní skladování

Aby mohl být vodík skladován v kapalném stavu, musí mít teplotu $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, z toho důvodu jsou na kryogenní skladování kladeny velmi náročné požadavky na použité materiály.

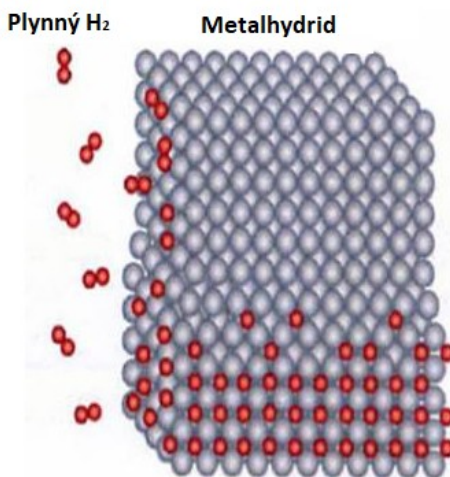
Vodík je uskladněn ve vícevrstvých nádobách s vynikajícími izolačními vlastnostmi o maximálním přetlaku 5 bar. I přes veškerou izolaci nádrže dochází k nežádoucímu přestupu tepla z okolí, a tím i k postupnému odpařování vodíku. Čím více vodíku se odpaří, tím víc se zvyšuje tlak v nádobě, proto musí být tento tlak redukován. Obvyklé ztráty vodíku odparem jsou až 3 % za den, odpařený vodík může být poté jímán v přidavných tlakových nádobách. Zkapalňování vodíku je energeticky náročné, energie nutná pro zkapalnění dosahuje až k 40 % uskladněné energie. [21]

1.7.3 Hydridy kovů

Tato metoda skladování využívá toho, že určité materiály jsou za vysokého tlaku a mírné teploty schopny absorbovat vodík. Vodík se tedy stane součástí chemické struktury těchto kovů a ke skladování již není zapotřebí ani vysoký tlak či nízká teplota. Ke zpětnému uvolňování vodíku pak dochází při nízkém tlaku a relativně vysoké teplotě.

Hydridy kovů jsou obvykle na bázi slitin hořčíku, niklu, titanu a železa. Podle způsobu desorpce vodíku lze hydridy rozdělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní.

Mezi nevýhody tohoto způsobu skladování patří nízká hustota skladované energie. Obvyklá koncentrace vodíku v hydridech je okolo 2 %, nejlepší pak mají až 8 %. Proto mají tyto systémy skladování velkou hmotnost a jsou také velmi drahé. [12]



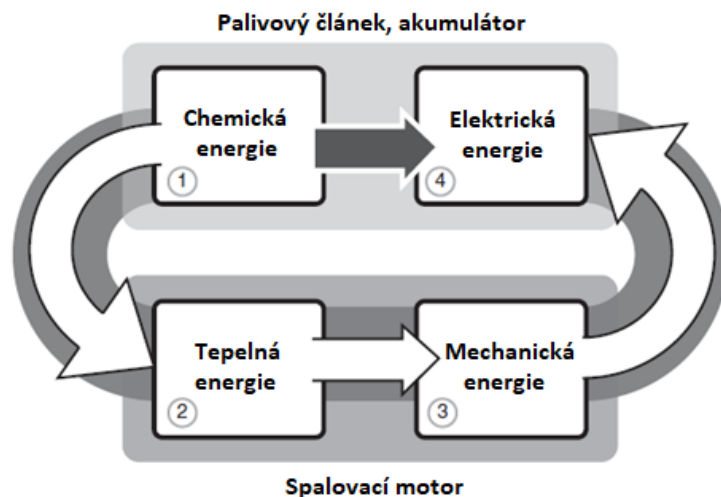
Obr. 17 – Princip skladování vodíku v hydridech kovů [22]

1.8 Výhody a nevýhody vodíkových palivových článků

Palivové články mají oproti jiným způsobům výroby elektrické energie mnoho výhod, ovšem v současnosti jsou tyto výhody ještě prozatím převáženy spoustou nevýhod.

Mezi výhody palivových článků patří zejména:

- Vysoká účinnost transformace chemické energie vázané v palivu na elektrickou energii, která se pohybuje okolo 50 - 60 %
- Téměř žádné emise škodlivých látek
- Modulární koncepce
- Vysoká spolehlivost
- Tichý provoz



Obr. 18 – Srovnání procesů přeměny energií u palivových článků a spalovacích motorů, upraveno z [3]

Palivové články, na rozdíl od klasických spalovacích motorů přeměňují chemickou energii vázanou v palivu přímo na elektrickou energii. V případě spalovacího motoru dochází nejprve k přeměně chemické energie na teplo, které je následně přeměněno na mechanickou energii. Ta může být využita přímo, ale většinou se však mechanická energie dále transformuje na elektřinu. Vzhledem ke složitosti a nemalým ztrátám při dílčích přeměnách (zejména při přeměně chemické energie v tepelnou) je výsledná účinnost celého procesu výrazně menší než u palivových článků.

Palivové články mají ovšem i mnoho nevýhod:

- Vysoké pořizovací náklady
- Problémy dostupností a skladováním paliva, vysoké energetické nároky na skladování
- Relativně nízká životnost (řádově tisíce hodin)
- Nutnost celé řady pomocných zařízení, které spotřebovávají značné množství vyrobené energie a snižují tak celkovou účinnost
- Citlivost na nečistoty v použitém palivu
- Pokles účinnosti v čase

Největší nevýhodou palivových článků jsou jejich pořizovací náklady, proto se jejich využití soustředí pouze na vybrané oblasti. Další problémy nastávají s palivem. Nejvhodnější je pro palivové články čistý vodík, který bohužel není široce dostupný, má malou objemovou hustotu energie, ve směsi se vzduchem je výbušný a obtížně se skladuje.

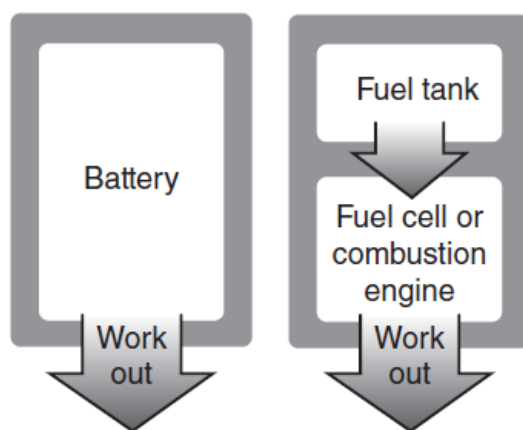
2. Srovnání palivových článků s elektrochemickými akumulátory a fotovoltaickými články

Palivové články a akumulátory pracují na podobném principu přímé přeměny chemické energie na elektrickou. Rozdíl spočívá v tom, že akumulátor zprostředkovává jak funkci přeměny energie, tak i její zásobník. Od velikosti akumulátoru se tedy odvíjí jeho kapacita a výkon. Zato palivový článek slouží pouze k přeměně chemické energie na elektrickou, zatímco zásoba energie je řešena nádrží na palivo. Oproti akumulátorům lze tedy oddělit funkci zásobníku od zdroje energie. Tyto dvě funkce lze řešit odděleně a nezávisle na sobě. Dle potřebné doby trvání určitého výkonu se odvíjí velikost nádrže na palivo a od požadovaného výkonu velikost palivového článku. [3]

Dalším rozdílem mezi akumulátory elektrické energie a palivovými články je doba trvání jejich nabití, respektive doplnění paliva. Akumulátory musí být po vybití znovu nabity, což trvá řádově hodiny. V některých případech, jako jsou například záložní zdroje, je takové prodloužení nežádoucí.

Naproti tomu doplnění paliva pro palivové články trvá výrazně kratší dobu, řádově minuty, maximálně však desítky minut. Po doplnění paliva je palivový článek ihned schopen dalšího provozu.

Fotovoltaické články jsou založeny rovněž na principu přímé přeměny energie, ovšem místo chemické energie vázané v palivu nebo hmotě akumulátoru využívají energii slunečního záření dopadajícího na jejich povrch. Proto jsou závislé na denní době a povětrnostních podmínkách, jsou ovšem schopny dodávat energii vždy, když na ně dopadají sluneční paprsky.

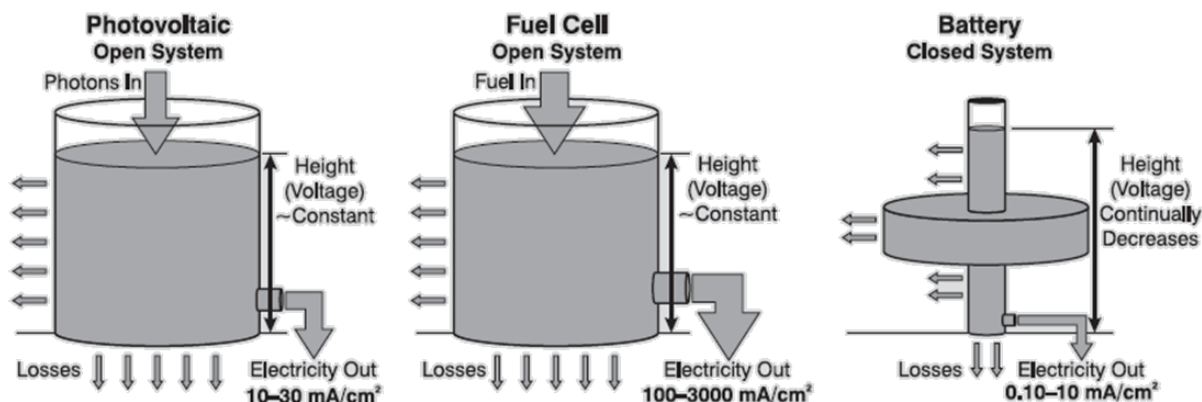


Obr. 19 – Srovnání akumulátorů s palivovými články [3]

Plošná hustota energie je u palivových článků výrazně větší, než je tomu u akumulátorů nebo fotovoltaických panelů. Palivové články jsou schopny dodávat proud dosahující hodnoty až $3000 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, zatímco fotovoltaické panely zhruba $10 - 30 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ a akumulátory pouhých $0,1 - 10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ aktivní plochy.

2.1 Porovnání na základě analogie nádrže s přítokem a odtokem

Tak jako lze mnoho principů a jevů v elektrotechnice vysvětlit na základě analogie, lze i elektrochemické zdroje mezi sebou porovnat vhodnou analogií.



Obr. 20 – Porovnání fotovoltaických panelů, palivových článků a akumulátorů pomocí analogie [3]

Fotovoltaické panely spolu s palivovými články můžeme chápat jako „otevřený“ termodynamický systém, který pracuje v ustáleném stavu. To znamená, že výstupní napětí je neměnné po celou dobu, kdy je zajištěn konstantní odběr a konstantní dodávka energie z externího zdroje. Jedná se palivo v případě palivových článků nebo o fotony u fotovoltaických článků. To je znázorněno na příkladu nádrže s vodou (obr. 20).

Výstupní napětí je znázorněno výškou hladiny, výstupní výkon představuje velikost odtokového otvoru z nádrže a vstupní energii si lze představit jako přítok do nádrže. Pokud zachováme dodávku vstupní energie (palivo, fotony) a zároveň zvýšíme odběr, nastane pokles napětí (hladiny), který bude trvat tak dlouho, dokud nenastane znovu rovnováha mezi přítokem a odtokem. V opačném případě, při poklesu výstupního výkonu, nastane nárůst napětí, které opět dosáhne ustáleného stavu.

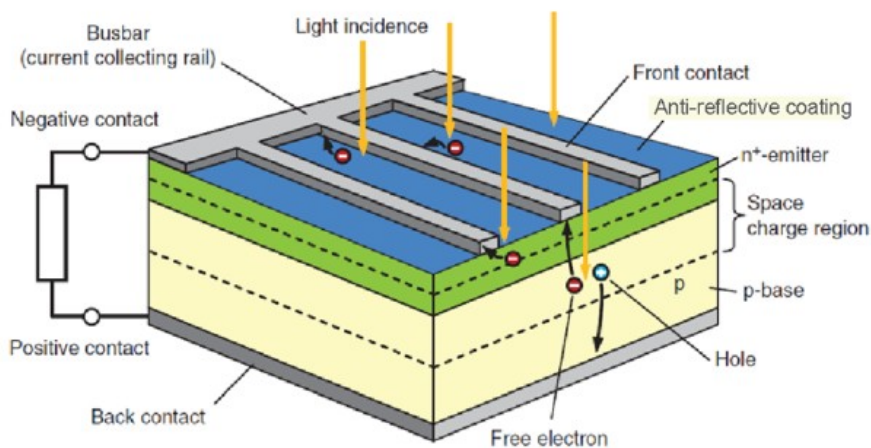
Naproti tomu většina akumulátorů tvoří „uzavřený“ termodynamický systém, který má k dispozici pouze omezenou zásobu energie, nemá žádný přítok (resp. má, ale pouze je-li dobíjen). Pokud budeme uvažovat, že akumulátor není zrovna dobíjen, při odběru elektrické energie bude napětí klesat. Pokud budeme výkon odebírat delší dobu, dojde k poklesu napětí. Nejprve dojde k rychlému poklesu, pak nastane oblast relativně konstantního napětí a nakonec úplné vybití, kdy se napětí prudce sníží. Pokles hodnoty výstupního napětí je tedy nelineární.

V následující části je pro srovnání s palivovými články uveden základní princip fotovoltaických článků a akumulátorů, jejich voltampérová charakteristika a náhradní schéma.

2.2 Fotovoltaické články

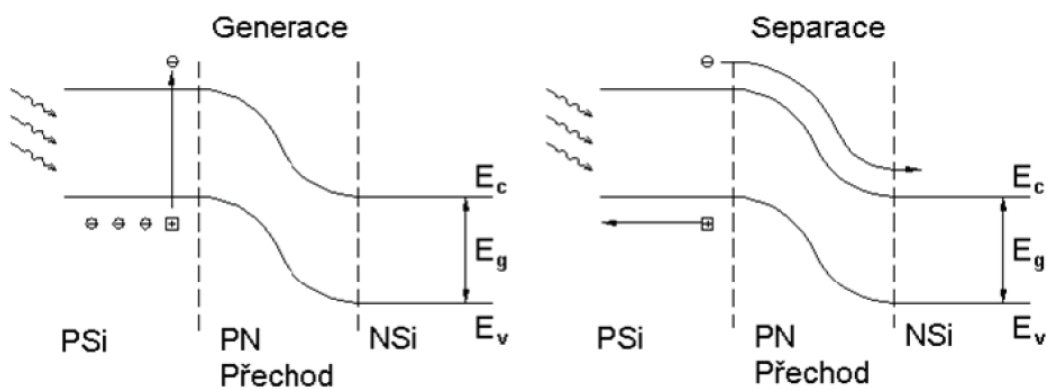
Jak již bylo zmíněno, fotovoltaické články přeměňují sluneční záření přímo na elektrickou energii. Tato přeměna se uskutečňuje za běžných podmínek s účinností okolo 5 – 16 % v závislosti na druhu použitého článku. V laboratorním prostředí byla naměřena účinnost až 25 %. [1]

2.2.1 Princip



Obr. 21 – Struktura fotovoltaického článku [25]

Fotovoltaický článek pracuje na principu fotoelektrického jevu, při kterém jsou uvolňovány elektrony v důsledku absorpce elektromagnetického záření (interakce fotonů s částicemi hmoty). Foton v takovém případě uvolní elektron při vzniku páru elektron – díra. Pokud by tento pár nebyl separován, došlo by k jeho rekombinaci (zániku). Proto jsou fotovoltaické články založeny na polovodičovém PN přechodu, který separuje elektrony a díry pomocí vnitřního elektrického pole.



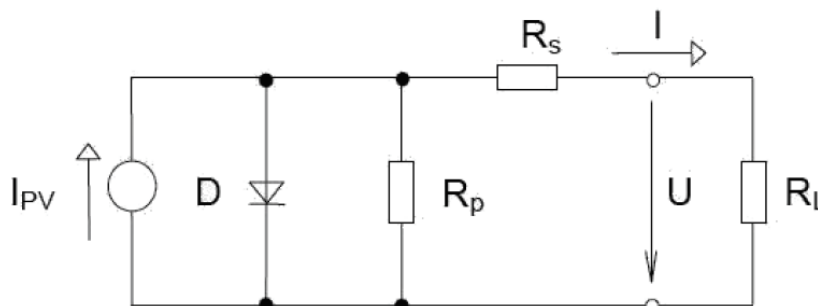
PSi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N, E_c – energie vodivostního pásu, E_v – energie valenčního pásu

Obr. 22 – Princip přeměny záření na elektrickou energii [1]

Čím větší je intenzita dopadajícího záření, tím větší je generovaný proud (tím více se uvolní elektronů). Napětí fotovoltaického článku je dáno PN přechodem, u křemíkového článku se pohybuje okolo 0,5 V, proto pro dosažení vyššího napětí se články zapojují do série, čímž vznikne modul (panel). Při paralelním zapojení dojde ke zvýšení hodnoty proudu.

2.2.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma fotovoltaického článku se skládá z proudového zdroje I_{PV} jehož hodnota proudu závisí především na intenzitě osvětlení článku, dále pak polovodičové diody D , sériového odporu R_s a paralelního odporu R_p (obr. 23).



Obr. 23 – Náhradní schéma fotovoltaického článku [1]

Kvalitu fotovoltaického článku udávají zejména hodnoty jeho sériového a paralelního odporu. Pokud bude sériový odpor příliš vysoký, bude výstupní napětí článku klesat se zatížením o to rychleji a také bude docházet k větším ztrátám. Naopak nízká hodnota paralelního odporu znamená, že se článek chová jako by byl uvnitř zkratován. Tyto dva parametry určují tvar voltampérové charakteristiky. [29]

S využitím náhradního schématu lze popsat výstupní proud fotovoltaického článku následující rovnicí:

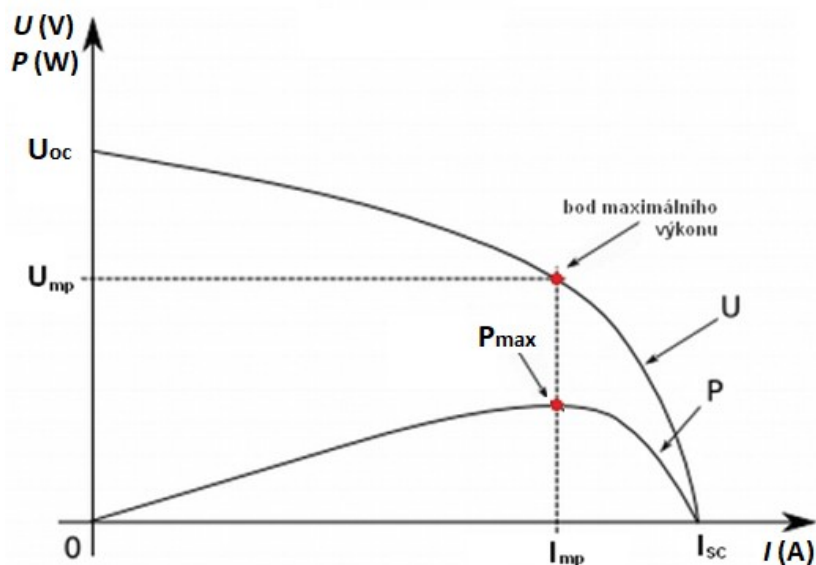
$$I = A \cdot J - I_{01} \left[\exp \left(e \cdot \frac{U + R_s I}{kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \cdot \frac{U + R_s I}{2kT} \right) \right] - \frac{U + R_s I}{R_p}$$

kde I je proud dodávaný článkem do zátěže (A), A ozářená plocha (m^2), J proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$), e náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), U napětí na svorkách článku (V), T termodynamická teplota (K), k představuje Boltzmannovu konstantu ($1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).

2.2.3 Voltampérová charakteristika

Jmenovité parametry fotovoltaického článku jsou vždy vztaženy ke standardním testovacím podmínkám, což znamená intenzitu slunečního záření $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a vzduchové hmotě $\text{AM} = 1,5$.

Mezi hlavní parametry solárního článku patří napětí naprázdno (U_{oc}) a proud nakrátko (I_{sc}). Napětí naprázdno je napětí na svorkách fotovoltaického článku, který není zatížený, proud nakrátko je zkratový proud, při kterém je napětí článku nulové. V obou těchto případech je výkon fotovoltaického článku roven nule. Mezi těmito dvěma extrémy leží na voltampérové charakteristice bod, při němž je odebíraný výkon maximální (P_{max}). Tomuto výkonu odpovídají hodnoty proudu I_{mp} a napětí U_{mp} . Během provozu fotovoltaického článku je nejvhodnější jej provozovat právě v bodě maximálního výkonu.



Obr. 24 – Voltampérová a výkonová charakteristika fotovoltaiického článku, upraveno z [1]

Mezi základní provozní parametry fotovoltaiického článku patří tzv. činitel plnění (FF) a účinnost (η). Činitel plnění se vypočte jako podíl maximálního výkonu (P_{max}) a výkonu vypočteného z napětí naprázdno a proudu nakrátko:

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Výpočet účinnosti fotovoltaiického článku vychází z podílu maximálního výkonu a výkonu dopadajícího slunečního záření:

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{E \cdot A}$$

kde P_{in} je výkon dopadajícího slunečního záření (W), E intenzita dopadajícího záření ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), A plocha fotovoltaiického článku (m^2). [1]

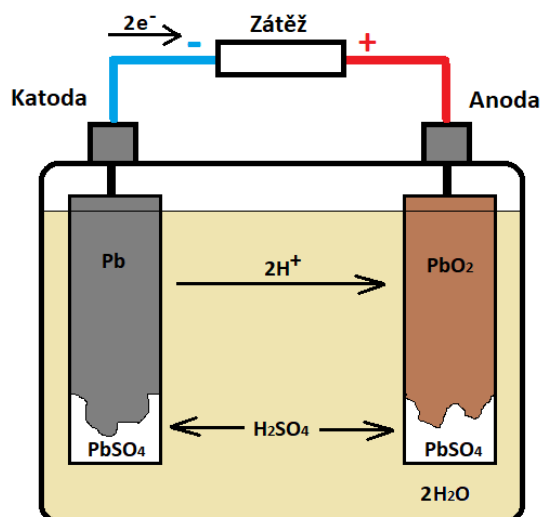
2.3 Akumulátory

Akumulátory jsou elektrochemické zdroje sloužící k uchování elektrické energie v podobě energie vázané v chemických sloučeninách. V praxi existuje mnoho druhů akumulátorů lišících se svými vlastnostmi (napětí, kapacita, složení atd.), základní princip všech akumulátorů je však stejný. Při nabíjení akumulátoru dochází vlivem průchodu elektrického proudu k vratným chemickým změnám na elektrodách, které se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem. energii pak lze z akumulátoru čerpat, přičemž se tyto změny opět vrátí do stavu před nabitím.

Vzhledem k velkému množství typů akumulátorů jsou v následující části uvedeny pouze olověné akumulátory, ty jsou široce používány v mnoha oblastech. Jako příklad lze uvést startovací baterie automobilů, baterie záložních zdrojů atd.

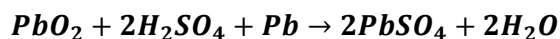
2.3.1 Princip

Katoda olověných akumulátorů je tvořena čistým olovem (Pb), anodu tvoří oxid olovičitý (PbO₂). Jako elektrolyt slouží kyselina sírová (H₂SO₄) zředěná vodou (H₂O). Napětí nabitého článku dosahuje hodnoty 2,1 V. Z důvodu vyššího napětí se obvykle jednotlivé články spojují sériově do většího celku – baterie.

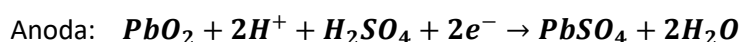
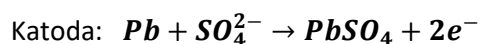


Obr. 25 – Zjednodušené schéma olověného akumulátoru

Souhrnná chemická reakce při vybíjení olověného akumulátoru je následující (pro nabíjení platí v opačném směru): [26]

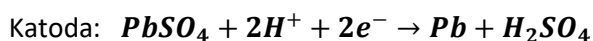
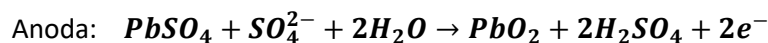


Díličí reakce na elektrodách při vybíjení pak jsou:



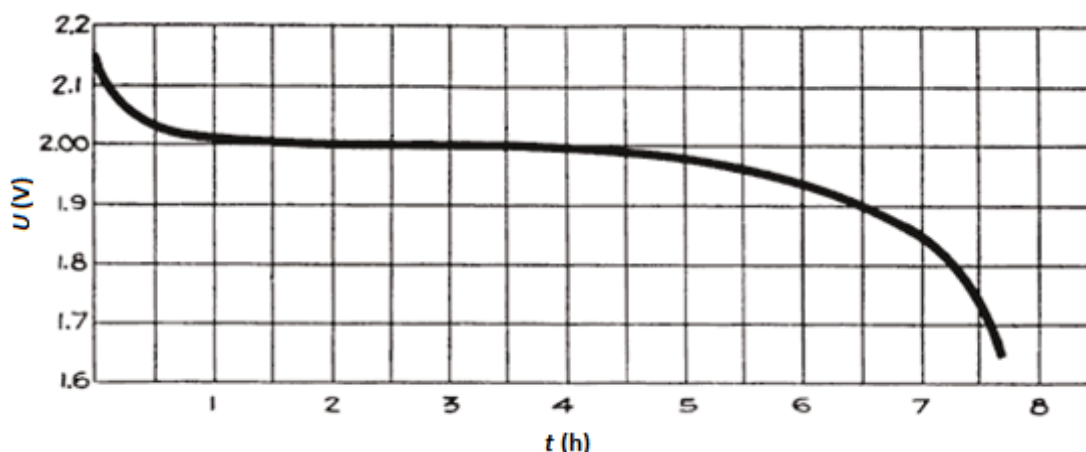
V důsledku chemických reakcí na obou elektrodách dochází v elektrolytu k úbytku kyseliny sírové, čímž klesá hustota elektrolytu lineárně s postupujícím vybíjením akumulátoru. Na obou elektrodách vzniká síran olovnatý (PbSO₄). Akumulátor lze považovat za zcela vybitý při napětí 1,75 V.

Při nabíjení pak dochází ke zvyšování hustoty elektrolytu, chemické reakce lze popsat:



2.3.2 Vybíjecí charakteristika

Pokles napětí při vybíjení je závislý na konstrukci akumulátoru a jeho proudovém zatížení. V důsledku tvorby síranu olovnatého na obou elektrodách se postupně zvyšuje pokles napětí na akumulátoru. Vnitřní odpor je na konci vybíjení zhruba dvojnásobný oproti nabitému. [26]



Obr. 26 – Průběh napětí olověného akumulátoru při vybíjení v čase, upraveno z [30]

Napětí na akumulátoru lze popsat rovnicí:

$$U_V = U_e - I \cdot R_i$$

kde U_V je napětí článku při vybíjení (V), U_e napětí článku naprázdno (V), I vybíjecí proud (A) a R_i vnitřní odpor (Ω).

2.3.3 Účinnost

U akumulátorů se rozlišuje ampérhodinová nebo watthodinová účinnost. Obě účinnosti se navzájem liší.

- Ampérhodinová účinnost**

Ampérhodinová účinnost akumulátorů se vypočte jako poměr ampérhodin do úplného vybití k ampérhodinám potřebným pro nabití akumulátoru:

$$\eta_{Ah} = \frac{I_V \cdot t_V}{I_N \cdot t_N} \cdot 100$$

kde η_{Ah} je ampérhodinová účinnost (%), I_V vybíjecí proud (A), t_V doba vybíjení (h), I_N nabíjecí proud (A), t_N doba nabíjení (h).

U olověného akumulátoru se ampérhodinová účinnost pohybuje od 84 % do 90 % v závislosti na mnoha faktorech, jako je například konstrukce akumulátoru, teplota nebo vybíjecí proud.

- Watthodinová účinnost**

Watthodinová účinnost se vypočte jako poměr odebraných watthodin z akumulátoru do úplného vybití k watthodinám potřebných pro úplné nabití:

$$\eta_{Wh} = \frac{U_{Vs} \cdot I_V \cdot t_V}{U_{Ns} \cdot I_N \cdot t_N} \cdot 100$$

kde η_{Wh} je watthodinová účinnost (%), U_{Vs} střední hodnota vybíjecího napětí (V), U_{Ns} střední hodnota nabíjecího napětí (V).

Jelikož v průběhu nabíjení a vybíjení není napětí konstantní, je nutné pro výpočet watthodinové účinnosti použít střední hodnotu napětí. Watthodinová účinnost je menší než ampérhodinová, u olověných akumulátorů se pohybuje okolo 65 – 75 %.

Při nižších vybíjecích a nabíjecích proudech je dosahováno vyšších účinností (jak Wh, tak i Ah). [26]

2.4 Shrnutí

Pokud se blíže zaměříme na akumulátory a palivové články zjistíme, že mají společného mnohem více, než se na první pohled může zdát. Jak akumulátory, tak i palivové články jsou elektrochemické zdroje, oba generují stejnosměrné napětí nízké hodnoty, mají anodu a katodu, které jsou v kontaktu s elektrolytem a pro dosažení vyššího napětí se řadí do série. Chemické reakce probíhají současně jak na anodě, tak i na katodě a aby chemická reakce byla kompletní, musí projít elektrony vnější zátěží.

Rozdíl přichází ve způsobu uskladnění chemické energie. Akumulátory uchovávají energii přímo v hmotě anody a katody, jejich materiál se v průběhu vybíjení spotřebovává a po vybití je nutné akumulátor nabít, čímž se znovu obnoví obě elektrody do původního stavu. Zato palivový článek je schopen pracovat tak dlouho, dokud je z vnějšího zdroje dodáváno palivo. [12]

I fotovoltaické a palivové články mají mnohé společné rysy. Například oba k tomu, aby dodávaly elektrický výkon, potřebují konstantní přívod energie z vnějšku. Podobnost lze najít u obou zdrojů i ve voltampérové charakteristice. Jak palivové články, tak i fotovoltaické panely lze považovat za proudové zdroje.

Tab. 4 – Srovnání zdrojů elektrické energie založených na principu přímé přeměny

	Palivové články PEM	Fotovoltaické články	Akumulátory
Zdroj energie	Chemická energie vázaná v palivu	Sluneční záření	Chemická energie vázaná v elektrodách
Napětí článku	1 – 0,5 V (dle zatížení)	0,5 V	1,2 – 3,7 V (dle druhu)
Účinnost	50 – 60 %	13 – 20 %	65 – 90 %
Proudová hustota	100 – 3000 mA·cm ⁻²	10 – 30 mA·cm ⁻²	0,1 – 10 mA·cm ⁻²
Odezva při změně zatížení	Rychlá	Nelze posoudit	Velmi rychlá
Životnost	10 ⁴ hodin	25 – 30 let	10 ² – 10 ³ cyklů
Cena	Poměrně vysoká	Stále klesá	Přijatelná
Možnost recyklace	Recyklují se*	Nákladná a složitá	Běžně se recykluje

*Co se týče recyklace palivových článků, nabízí firma Ballard svým zákazníkům možnost repase vysloužilých modulů. Během repase se nahradí původní opotřebené membrány novými při využití stávajících komponentů, což vyjde až o 30 % levněji než pořízení nového modulu. Staré membrány se pak recyklují, přičemž lze pak znovu využít více než 95 % vzácných kovů. [32]

3. Vlastnosti palivových článků PEM

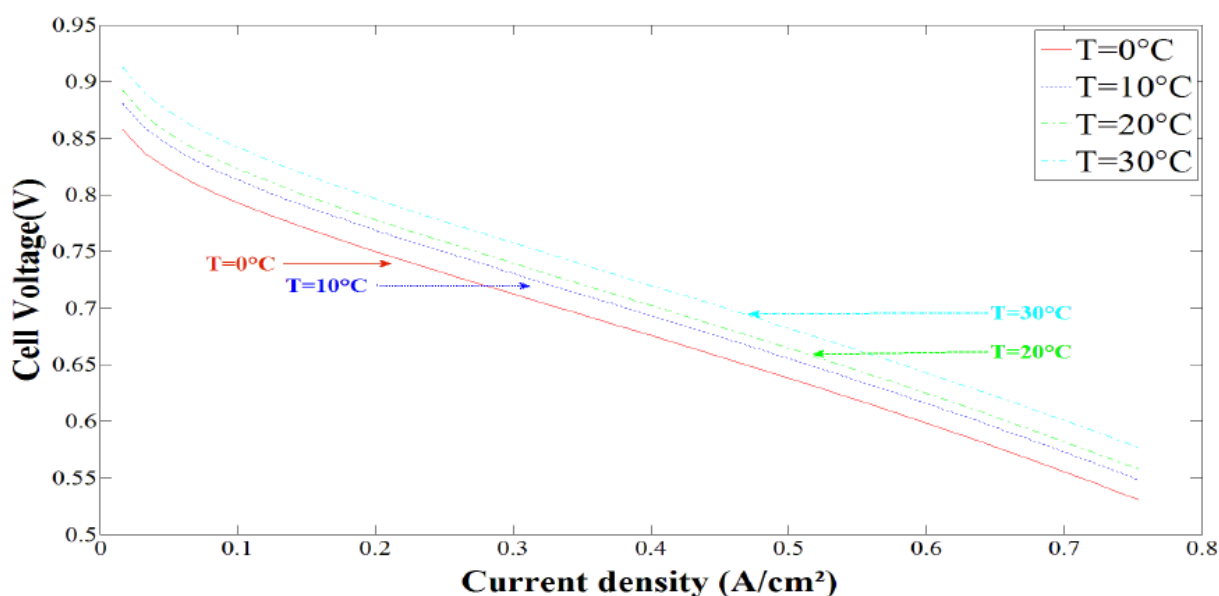
Palivový článek, jako takový, není schopen samostatné funkce, proto musí mít pro svůj provoz celou řadu pomocných obvodů a systémů. Mezi ně patří okruh paliva, okruh okysličovadla, chladicí okruh a v neposlední řadě elektrický okruh. Tyto systémy ve výsledku ovlivňují provozní vlastnosti a charakteristiky palivového článku.

3.1 Vliv teploty, tlaku a vlhkosti na VA charakteristiku palivového článku

Každá změna parametru má vliv na výsledný výkon a účinnost palivového článku. Tvar VA charakteristiky závisí zejména na provozní teplotě, vstupním tlaku paliva a okysličovadla a vlhkosti membrány.

3.1.1 Teplota

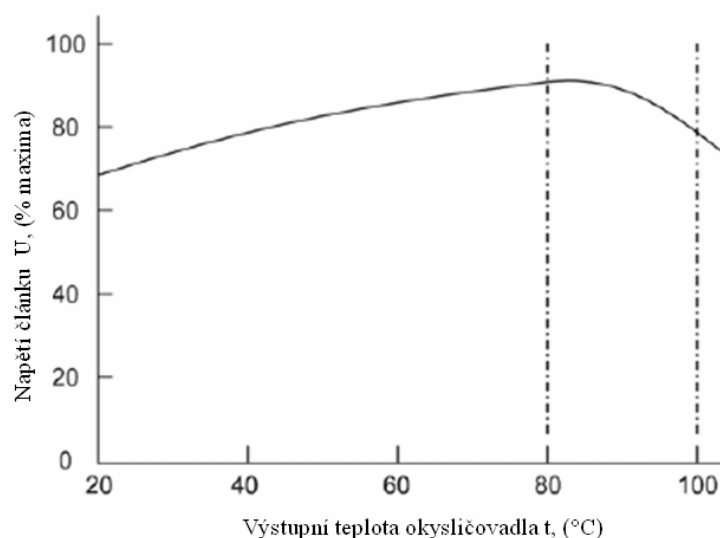
Velmi vysoká provozní teplota palivového článku má nepříznivý dopad na jeho funkčnost a životnost. U palivových článků PEM je maximální teplota dána teplotou varu vody. Při takové teplotě vznikající pára vytlačuje kyslík a tím dochází ke snížení výkonu. Může rovněž dojít ke zničení palivového článku. Na obr. 27 je znázorněna VA charakteristika pro teploty v rozmezí 0 – 30 °C.



Obr. 27 – Příklad VA charakteristik pro různé teploty [11]

S rostoucí teplotou klesají zejména aktivační a polarizační ztráty, naproti tomu ale nepatrně rostou ztráty vodivostní. Celkově ovšem má rostoucí teplota pozitivní dopad na velikost úbytku napětí.

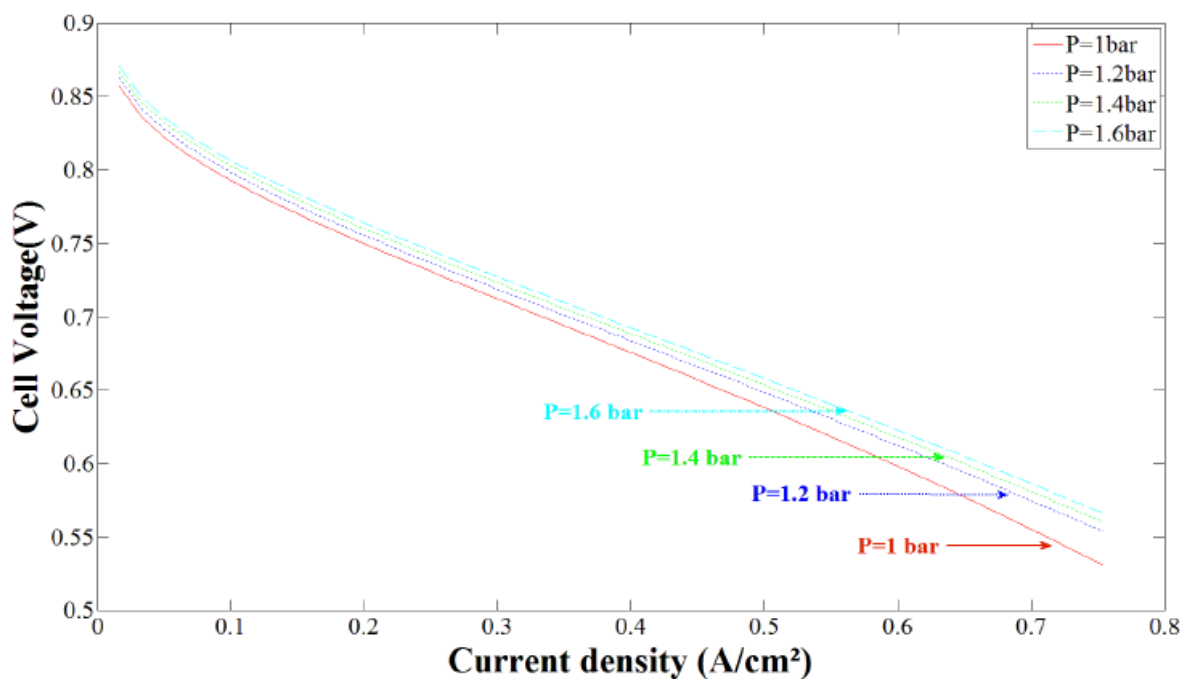
Vyšší teplota způsobuje rychlejší průběh vnitřních reakcí v článku. Optimální teplota palivového článku je v rozmezí 70 – 90 °C. Při vyšších teplotách již může dojít ke snižování výkonu.



Obr. 28 – Vliv teploty na napětí PEM článku [12]

3.1.2 Tlak

Vodík a vzduch dodávaný palivovému článku musí mít určitý tlak, jeho změna má opět vliv na VA charakteristiku.



Obr. 29 – Vliv tlaku na VA charakteristiku palivového článku [11]

Zvýšený vstupní tlak má příznivý dopad na úbytek napětí palivového článku. S rostoucím tlakem klesají jak aktivační, tak i koncentrační ztráty. Při vyšším pracovním tlaku tedy palivový článek pracuje s vyšší účinností. Výsledná charakteristika je na obr. 29. [11]

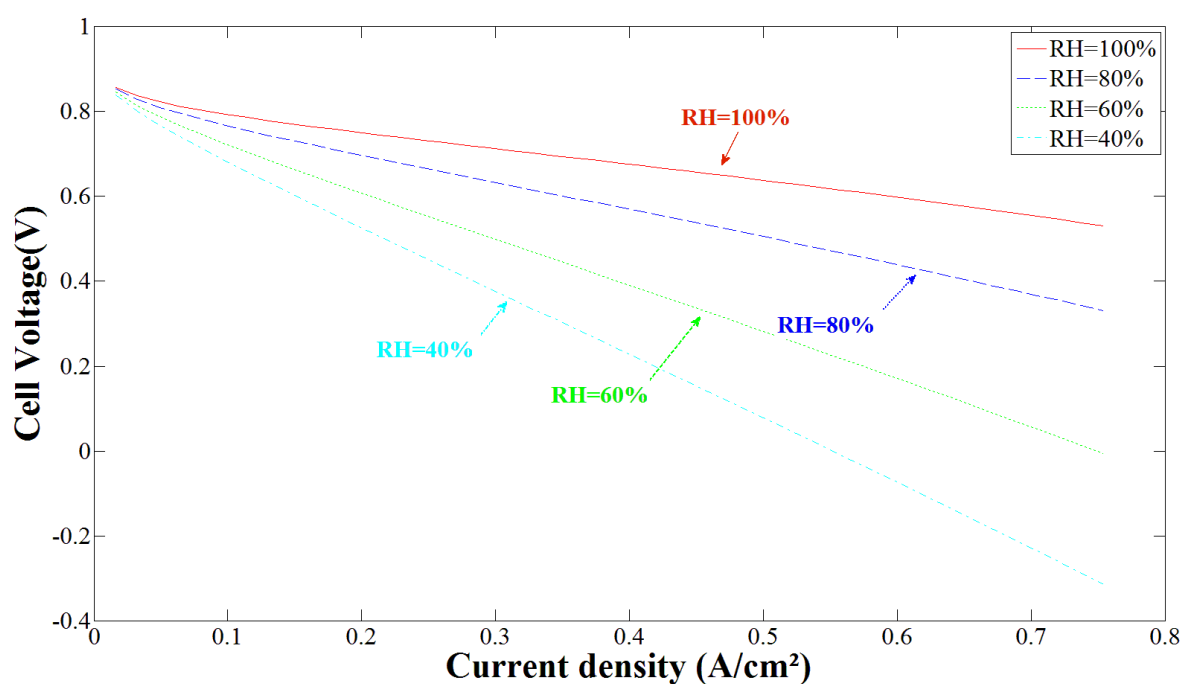
Vyšší tlak zvyšuje rychlost chemické reakce, napomáhá rychlejšímu transportu plynů k místu kontaktu s membránou. Nejvíce se zvýšený tlak projevuje při vyšších proudech a při použití vzduchu

jako oksyličovadla. Pokud je jako oksyličovadlo použit čistý kyslík, není změna jeho tlaku příliš markantní.

S narůstajícím tlakem se ovšem vyskytují i problémy. Například je více namáháno těsnění palivového článku a membrána. Je také nutné vynaložit více energie na kompresi oksyličovadla, což se projeví vyššími enegetickými nároky. Ve výsledku je účinnost celého systému nižší. [12]

3.1.3 Vlhkost

Vodivost membrány silně závisí na její vlhkosti. Jestliže membrána nemá dostatečnou vlhkost, dojde tím ke zhoršenému přenosu protonů a tedy snížení její vodivosti. Ve výsledku se rovněž sníží účinnost palivového článku.



Obr. 30 – Příklad vlivu vlhkosti na VA charakteristiku palivového článku [11]

Vliv vlhkosti membrány je zachycen na obr. 30. Jak je patrné, s klesající vlhkostí dochází k velmi výraznému úbytku napětí vlivem vodivostních ztrát.

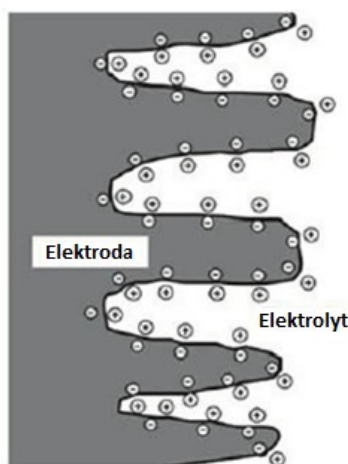
3.2 Vliv kapacity palivového článku

Protože jsou elektrody palivového článku odděleny elektrolytem, vzniká na rozhraní anoda – elektrolyt a elektrolyt – katoda tzv. dvojí vrstva (double layer). Toto rozhraní představuje kondenzátor s ohromnou kapacitou. Kapacitu lze obecně vypočítat podle vztahu:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{l} \quad (F, F \cdot m^{-1}, m^2, m)$$

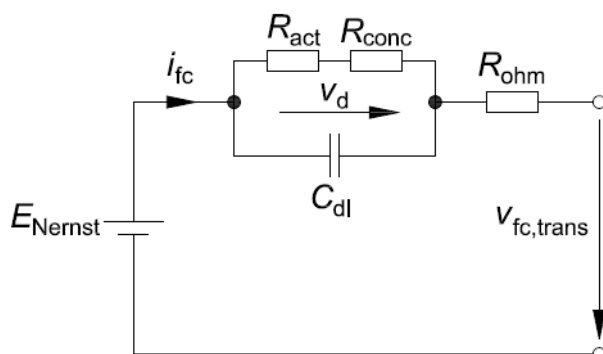
kde ε je permitivita, S je aktivní plocha povrchu rozhraní a l vzdálenost rozhraní.

Skutečný povrch elektrod je mnohonásobně (až několik tisíc krát) větší než jejich geometrický povrch. To je dáno porézností elektrod, kdy částice tvořící elektrodu vytváří nesčetné záhyby a dutiny, které zvyšují aktivní povrch elektrod. To je zobrazeno na obr. 31. Vzdálenost mezi rozhraním je velmi malá (řádově několik nanometrů), proto je výsledná kapacita obrovská, typicky několik faradů (F). [13]



Obr. 31 – Rozhraní elektroda – elektrolyt [13]

Kapacita palivového článku tedy představuje jeden ze stěžejních parametrů pro popis dynamických dějů. Na obr. 32 je znázorněno schéma reprezentující dynamické chování palivového článku.



Obr. 32 – Náhradní schéma dynamický popis palivového článku[18]

Kde kondenzátor C_{dl} představuje kapacitu dvojvrstvy, R_{ohm} je ohmický odpor, R_{act} aktivační odpor a R_{conc} je koncentrační odpor palivového článku. E_{Nerst} je tzv. Nerstovo napětí, tedy napětí naprázdno palivového článku.

3.3 Poruchové stavy palivových článků PEM a jejich projevy

V systémech s palivovými články může dojít k mnoha poruchovým stavům. Poruchové stavy palivových článků lze rozdělit na trvalé a přechodné. V takovémto systému může ovšem vzniknout i externí porucha mimo vlastní palivový článek, jedná se například o poruchy na kompresoru, zvlhčovači, invertoru apod. Externí porucha rovněž omezí provoz celého systému, avšak palivový článek není příčinou. [10]

Trvalé poruchy jsou nevratné, mají definitivní vliv na výkon palivového článku, který pak bývá výrazně nižší než jmenovitý. Tyto poruchy lze vyřešit pouze náhradou palivového článku za nový. Mezi trvalé poruchy lze zařadit:

- Stárnutí membrány
- Absence katalyzátoru
- Otrava katalyzátoru (např. oxidem uhelnatým)
- Úniky reaktantů
- Celkové stárnutí palivového článku

Přechodné poruchy mají dočasný charakter. Obvykle souvisí s provozním režimem palivových článků. Mezi tyto poruchy se řadí:

Zavodnění palivového článku (flooding)

Protože jsou články PEM provozovány při relativně nízké teplotě, která dosahuje maximálně 90 °C, je hospodářství s vodou jakožto odpadním produktem klíčovou záležitostí. Pro správnou iontovou vodivost musí být membrána dostatečně nasycena vlhkostí. Pokud ovšem dojde k přesycení (zaplavení) vodou, tak dojde k zabránění toku reaktantu, protože se zmenší aktivní plocha membrány. Tím se zvětší aktivační a koncentrační ztráty a také poklesne i celková účinnost. [10]

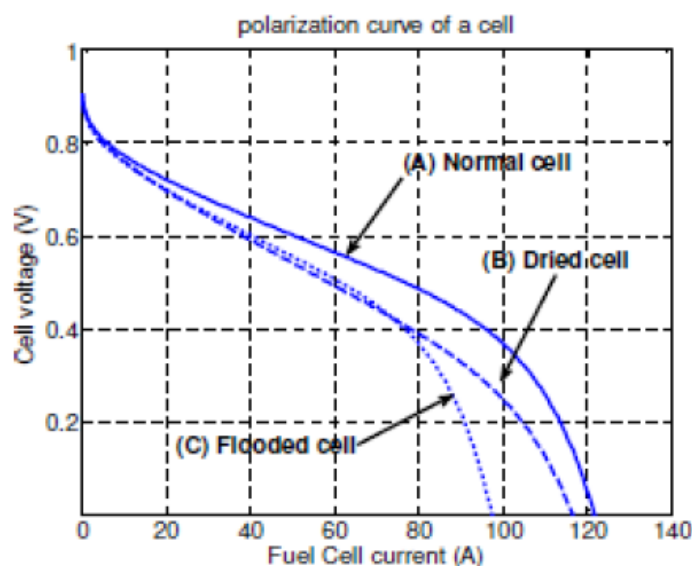
Z krátkodobého hlediska nemá zaplavení palivového článku zásadní vliv na jeho životnost, dojde pouze k přechodnému omezení jeho výkonu. Jiný případ ovšem nastává, pokud bude palivový článek takto provozován dlouhodobě. Pak může dojít k trvalému zvýšení ohmických ztrát vlivem koroze elektrod. [11]

Vysušení palivového článku (drying)

Pokud membrána neobsahuje dostatečnou vlhkost, narůstá její rezistivita a tím klesá účinnost palivového článku. Jestliže bude palivový článek takto provozován dlouhodobě, dojde k výraznému zkrácení jeho životnosti vlivem znehodnocení membrány (popraskání). K vysušení membrány může dojít jednak z důvodu nedostatku vlhkosti ve vstupujícím palivu (nebo také vzduchu), ale také vlivem vysoké teploty palivového článku. [10], [11]

Na obr. 33 jsou vyobrazeny VA charakteristiky „zaplaveného“ a „vysušeného“ palivového článku v porovnání s normálním článkem. Zatopený i vysušený článek mají zhruba stejný sklon VA charakteristiky, ale od napětí přibližně 0,4 V dochází u zatopeného článku k výraznějšímu propadu napětí.

Během provozu souboru palivových článků (stack) jsou napětí na jednotlivých článcích obvykle rozdílná. Většinou články blíže ke vstupu paliva mají vyšší napětí než články vzdálenější. To může být způsobeno nerovnoměrnou distribucí paliva spolu se zavodněním vzdálenějších článků. Články uprostřed souboru mají obvykle vyšší teplotu než články na krajích, proto mají tendenci být vysušované. Zato články nejbližší chladicích desek mohou být zavodněny.



Obr. 33 – Vliv zaplavené a vysušené membrány na VA charakteristiku palivového článku [10]

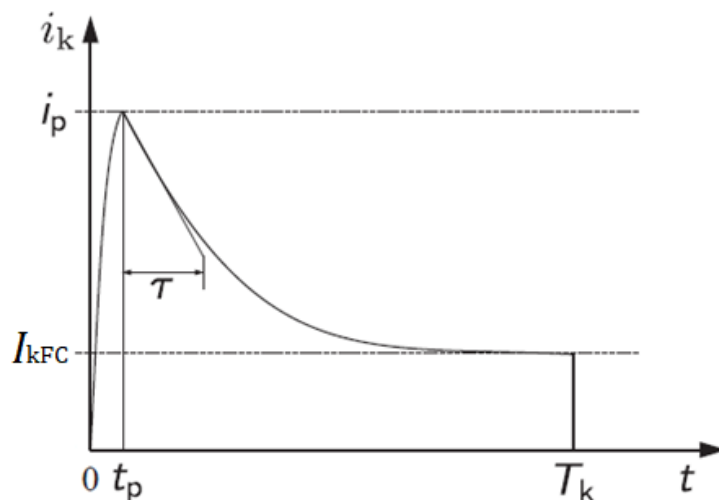
Uvedenými poruchovými stavy se v této práci již dále nebude zabývat, protože souvisí s režimem provozu palivových článků a mají původ v chemických nebo fyzikálních dějích.

Mezi přechodné poruchy můžeme zařadit také zkrat. Ten může vzniknout buď vlivem poruchy na připojené zátěži (typicky měnič, může se jednat i o jiný druh zátěže) nebo lidskou chybou či neopatrností (propojení obou pólů).

Při časně detekci a odpojení palivového článku od zkratového obvodu nehrozí žádné, případně minimální riziko. Ovšem pokud nebude zkrat v dostatečně krátkém čase eliminován, může dojít na palivovém článku k nevratným změnám, které způsobí omezení výkonu nebo úplné znemožnění jeho funkce. Dlouhotrvající zkrat se projeví zejména zvýšenou teplotou palivového článku.

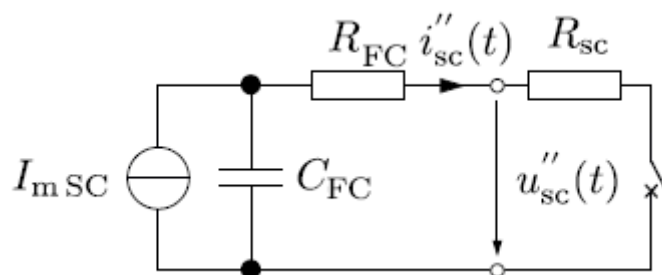
3.4 Zkrat palivového článku

Vzhledem k velké kapacitě palivového článku způsobené nábojem dvojvrstvy, dochází při zkratu k vybití této kapacity do zkratového obvodu. Tím se uvolní ve velmi krátké době veškerá energie za vzniku přechodného děje. Doba jeho trvání závisí na velikosti kapacity a odporu zkratového obvodu.



Obr. 34 – Obecný průběh zkratového proudu palivového článku [17]

Špičková hodnota zkratového proudu závisí zejména na velikosti vnitřního odporu palivového článku. Její velikost může dosahovat až desetinásobku jmenovité hodnoty proudu. Ustálená složka proudu obvykle dosahuje až dvojnásobku jmenovitého proudu, její velikost ovšem závisí na aktuálním provozním režimu palivového článku. [31]



Obr. 35 – Náhradní schéma palivového článku pro výpočet zkratového průběhu [18]

Tak jako každé složitější zařízení lze i palivový článek popsat na základě náhradního schématu složeného z jednoduchých pasivních elektrických prvků. Zjednodušené náhradní schéma pro výpočet zkratových poměrů palivového článku je na obr. 35.

Náhradní schéma pro zkratový obvod palivového článku se skládá z proudového zdroje, kde hodnota jeho proudu I_{mFC} odpovídá ustálené hodnotě zkratového proudu. Další součástí schématu je paralelně připojený kondenzátor, který reprezentuje kapacitu dvojvrstvy. Při zkratu, ale i při změně zatížení palivového článku dochází ke změnám náboje, což se projevuje přechodnými ději proudu a napětí. Rezistor R_{FC} představuje vnitřní odpor palivového článku a R_{sc} odpor vnějšího zkratového obvodu.

Zkratový proud palivového článku lze popsat následujícím vztahem:

$$i''_{SC}(t) = \frac{U_{FC(t=0)}}{R} \cdot e^{-\left(\frac{t}{R \cdot C_{FC}}\right)} + I_{mFC} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{R \cdot C_{FC}}\right)}\right]$$

kde $i''_{SC}(t)$ je časový průběh zkratového proudu (A), $U_{FC(t=0)}$ je napětí před okamžikem zkratu (V), R je celkový odpor zkratového obvodu (Ω), C_{FC} je vnitřní kapacita palivového článku (F), I_{mFC} je ustálená hodnota zkratového proudu po odeznění přechodného děje (A).

Dobu trvání přechodné složky proudu určuje časová konstanta. Ta se vypočte:

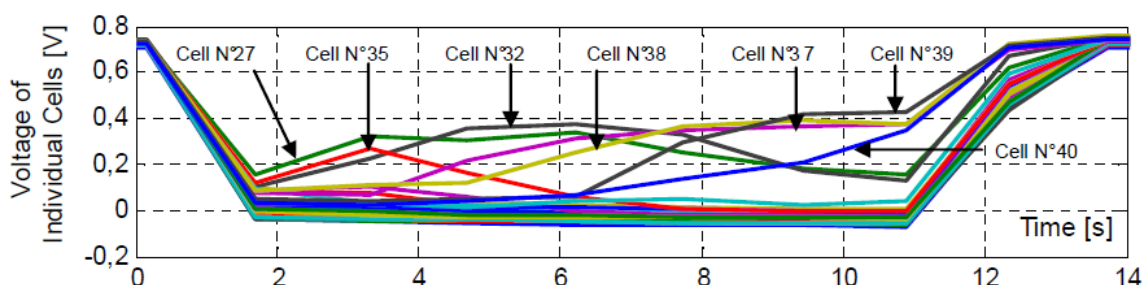
$$\tau = R \cdot C_{FC}$$

kde τ je časová konstanta (s), R odpor zkratového obvodu (Ω), C_{FC} vnitřní kapacita palivového článku (F). Přechodný děj ustane zhruba za dobu 3 – 5 τ .

Napětí palivového článku při zkratu na svorkách je nulové. Veškerý úbytek napětí vzniká na jeho vnitřním odporu.

3.4.1 Napěťové poměry během zkratu palivového článku

I když je při zkratu modulu palivových článků jeho svorkové napětí nulové, mohou se napětí dílčích článků mezi sebou výrazně lišit, na některých se může dokonce objevit i záporná hodnota (obr. 36). Napětí jednotlivých článků závisí na jejich umístění v modulu.



Obr. 36 – Příklad průběhu dílčích napětí během zkratu palivového článku (celkový počet článků je 40) [34]

Články, které jsou umístěny poblíž vstupu vzduchu, mají obvykle nenulovou kladnou hodnotu napětí, která dosahuje až k 50 % jmenovitého napětí článku. Naopak články, které jsou dál od přívodu reakčního vzduchu, mají napětí nulové, či dokonce záporné. K tomuto stavu dochází vlivem rozdílných odporů článků, kdy se při velkém odporu začne článek chovat jako spotřebič. Tento stav může vést k poškození, a proto musí být trvání zkratu omezeno na co nejkratší dobu. [34]

4. Chránění systémů s palivovými články

Jelikož oblast chránění palivových článků před poruchovými proudy nebyla doposud v literatuře podrobně probírána, pokusím se v této části nastínit možné způsoby jejich ochrany. Mojí snahou je shrnout použitelné možnosti a poukázat na možná rizika při různých způsobech chránění. Zaměřím se také na aktuální stav chránění před zkratovými proudy v laboratoři vodíkových technologií a předložím návrh možného vylepšení.

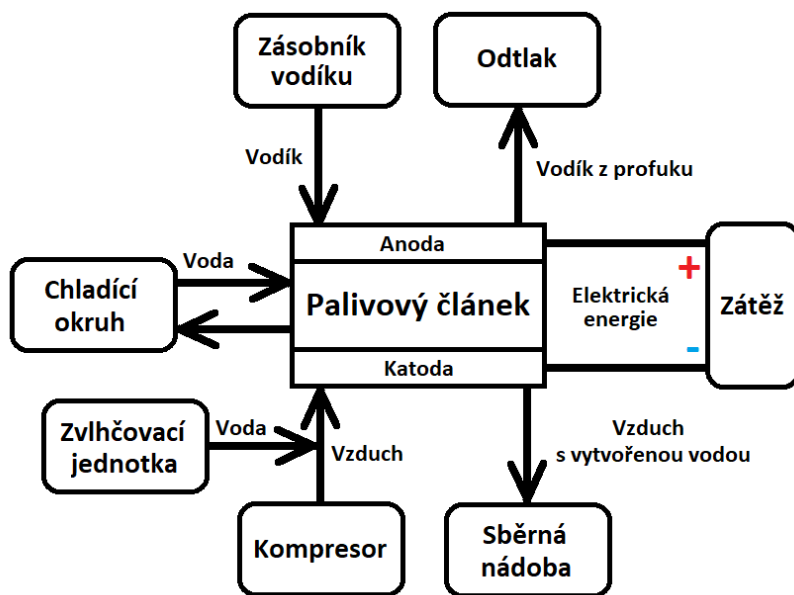
Palivový článek lze z hlediska jeho chování považovat za proudový zdroj. Velikost jeho zkratového proudu po ustálení dosahuje okolo dvojnásobku jmenovité hodnoty proudu, někdy i méně. Tato skutečnost výrazně omezuje použití jednoduchých jistících prvků, jako jsou pojistky či jističe. Chránění palivových článků vyžaduje sofistikované způsoby, které zahrnují spolupráci s řídicím systémem.

4.1 Popis laboratoře vodíkových technologií

Laboratoř vodíkových technologií se nachází v areálu Technologického centra Ostrava (TCO) v Ostravě - Vítkovicích, které je detašovaným pracovištěm VŠB – TUO. Součástí areálu je energetický systém pro akumulaci obnovitelné energie do vodíku a jeho zpětnou přeměnu na elektřinu v době její poptávky. Kromě této technologie zde jsou také jiná výzkumná zařízení. Jedná se například o pyrolýzní jednotku transformující organické odpady na alternativní paliva, fotovoltaickou elektrárnu, kogenerační jednotku anebo velkokapacitní akumulátorovou banku.

Pro akumulaci elektrické energie vyráběné fotovoltaickými panely do plynného vodíku zde slouží nízkoteplotní elektrolyzéry typu PEM. Vyrobený vodík je poté skladován ve velkokapacitních tlakových zásobnících, odkud je v případě potřeby odebírán palivovými články, které z něj opět vyrobí elektrickou energii. V laboratoři se nachází pětice modulů palivových článků, jejichž celkový výkon dosahuje až 40 kW. Tyto moduly jsou pro zvýšení výstupního napětí zapojeny sériově. Celý elektrický výkon je vyveden prostřednictvím výkonového vazebního měniče do místní sítě. Pro účely laboratorního měření lze palivové články provozovat samostatně s připojenou elektronicky řízenou DC zátěží.

Blokové schéma vybrané části vodíkového akumulačního systému, zobrazující propojení palivového článku s ostatními systémy, které zajišťují jeho bezpečný provoz, je na obr. 37. Podpůrná technologická zařízení jsou tvořena systémem přívodu vodíku z venkovního skladu plynů, systémem zajišťujícím přívod zvlhčeného reakčního vzduchu prostřednictvím kompresoru, systémem vodního chlazení, systémem tzv. „profuku“ palivových článků a systémem vyvedení elektrického výkonu (vazební měnič, případně elektronická DC zátěž).



Obr. 37 – Blokové schéma propojení palivového článku s ostatními systémy

4.1.1 Parametry a charakteristiky palivových článků

Moduly palivových článků v laboratoři nesou označení FCS 8 – XXL a jsou výrobkem firmy Nedstack. Jedná se o typ PEM palivového článku s pevným elektrolytem v podobě polymerní membrány, který jako palivo využívá plynný vodík o čistotě minimálně 2,5 (99,5 %).



Obr. 38 – Modul palivových článků od firmy Nedstack (pohled ze strany přívodů) [24]

Polymerní membrána (obchodní název Nafion) je vodivá pouze pro kladně nabitě ionty (vodíkové protony), které skrze ní prostupují z anodové strany palivového článku na stranu katodovou. Membrána je zároveň nevodivá pro elektrony, které jsou z palivového článku odváděny do vnějšího elektrického obvodu se zátěží. Pro zajištění správně funkce musí být membrána dostatečně zvlhčována, a to prostřednictvím vody rozptýlené v proudu reakčního vzduchu dodávaného na stranu katody.

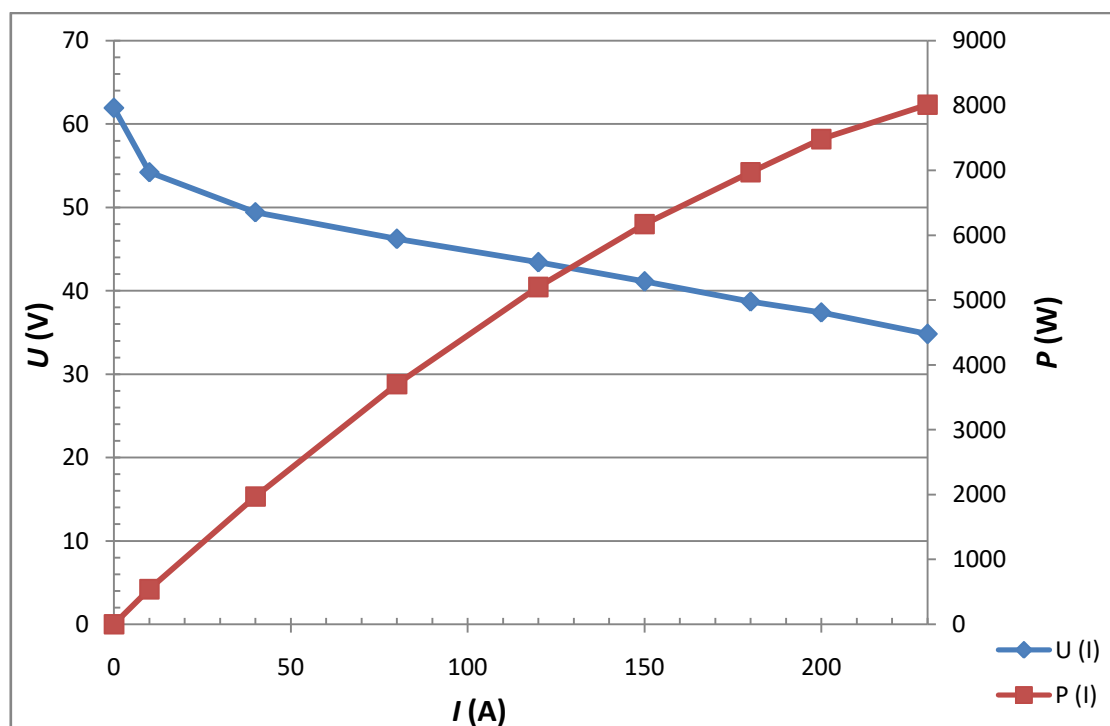
Katalyzátor, který na membránu doléhá, usnadňuje probíhající elektrochemické reakce. Je obvykle tvořen nanočásticemi platiny, které jsou potaženy na uhlíkovém papíru nebo látce. Za účelem dosažení co možná největší plochy katalyzátoru vystavené molekulám vodíku a kyslíku je katalyzátor drsný a porézní. Strana uhlíkového nosiče potažená platinovými nanočásticemi je směřována k polymerní membráně.

Modul Nedstack FCS 8 – XXL je schopen dodávat elektrický výkon až 8 kW při stejnosměrném napětí v rozsahu 61,9 V až 34,8 V a proudu 0 A – 230 A. Počet článků v modulu je 64, hodnota napětí na dílčích článcích během normálního provozu má rozsah 0,8 V až 0,4 V s tolerancí mezi články maximálně $\pm 10\%$, přičemž napětí jednoho článku nesmí klesnout pod 0,3 V. V případě poklesu napětí musí dojít k okamžitému odstavení celého systému. Součástí modulu je také monitorovací zařízení CVM (Cell Voltage Monitor) umístěné v jeho horní části, které monitoruje a vyhodnocuje napětí jednotlivých článků.

4.1.1.1 Polarizační a výkonová charakteristika

Na obr. 39 jsou uvedeny naměřené charakteristiky palivového článku. Z polarizační charakteristiky (modrý průběh) je patrný prudký pokles napětí vlivem aktivačních ztrát a postupný vliv ohmických ztrát. Napětí naprázdno dosahuje hodnoty 61,7 V, což odpovídá článkovému napětí zhruba 0,97 V. Při plném zatížení pak má celkové napětí hodnotu 34,6 V, na jeden článek tedy připadá 0,54 V.

Výkonová charakteristika (červený průběh) udává průběh elektrického výkonu na svorkách palivového článku při jeho postupném zatěžování. Při jmenovitém zatížení výkon dosahuje hodnoty 7,96 kW. Při dalším zvyšování odebíraného proudu by výkon dosáhl maximální hodnoty, poté by začal klesat.



Obr. 39 – Změřené charakteristiky palivového článku Nedstack FSC 8 – XXL (polarizační a výkonová křivka)

4.1.1.2 Spotřeba vodíku

Palivový článek během svého provozu spotřebovává vodík, jehož množství lze vypočítat na základě empirického vzorce udávaného výrobcem: [24]

$$Q_{V H_2} = 6,965 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot I$$

kde $Q_{V H_2}$ značí objemový průtok vodíku ($\text{Nl} \cdot \text{min}^{-1}$), n počet článků v sérii (-) a I proud palivového článku (A).

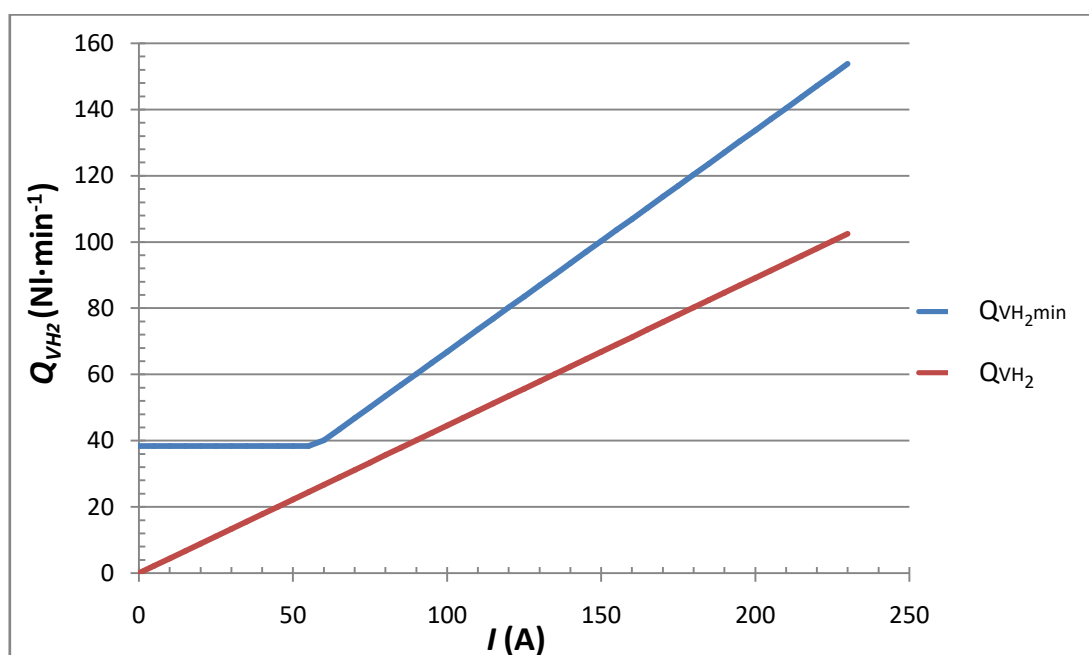
Pro správnou funkci musí palivový článek pracovat s určitým přebytkem vodíku. Ten se dle výrobce pohybuje v rozmezí 1,25 – 1,5.

$$Q_{V H_2 \min} = 1,5 \cdot 6,965 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot I$$

Modul palivových článků ovšem pro svou činnost při nízkém zatížení potřebuje minimální množství vodíku, které musí být:

$$Q_{V H_2 \min} \geq 0,6 \cdot n$$

Pro palivový článek FCS 8-XXL, který má 64 článků musí být minimální průtok paliva alespoň $38,4 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$. Výsledný potřebný průtok vodíku a jeho spotřeba v závislosti na výstupním proudu je na obr. 40.



Obr. 40 – Minimální průtok a spotřeba vodíku pro modul FCS 8-XXL

Rozdíl mezi modrou a červenou křivkou představuje nevyužitý vodík. Tento vodík prochází palivovým článkem a je vypuštěn do okolí bez užitku. Pro lepší využití je vhodné využít tzv. recirkulaci vodíku, kdy je tento přebytečný vodík znovu stlačen a opětovně využit v palivovém článku. V laboratoři není recirkulace v současné době využita, což snižuje výslednou účinnost celého systému.

4.1.1.3 Spotřeba vzduchu

Vzduch pro palivové články je přiváděn na katody palivových článků, na kterých během provozu vzniká rovněž odpadní voda. Vzduch vstupující do modulu musí splňovat požadavky na čistotu, musí být zbaven prachových částic a chemických prvků a sloučenin. V tab. 5 je uvedeno maximální dovolené množství kontaminantů v přívodním vzduchu. Jak lze vidět, limity pro kvalitu vzduchu jsou velmi přísné, protože i malá množství cizích látek mohou trvale poškodit celý modul.

Tab. 5 – Dovolené množství znečišťujících látek v přívodním vzduchu [24]

Znečišťující látka	Maximální dovolená koncentrace
Oxid uhelnatý (CO)	25 ppm
Síra	0,01 ppm
Oxid dusičitý (NO ₂)	0,3 ppm
Amoniak	1 ppm
Cizí částice	1 µg/l (20 °C, 1 atm)

Výrobce opět udává empirické vztahy pro výpočet množství spotřebovaného kyslíku a potřebného množství protékajícího vzduchu. Spotřeba kyslíku se vypočte následovně:

$$Q_{VO_2} = 3,483 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot I$$

kde Q_{VO_2} značí objemové množství spotřebovaného kyslíku (Nl·min⁻¹), n počet článků v sérii (-) a I proud palivového článku (A).

Skutečný průtok vzduchu musí být několikanásobný oproti spotřebovanému kyslíku s ohledem na skutečnost, že ve vzduchu jeho obsah činí zhruba 21 %.

$$Q_{Vvzduc h} = 33,168 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot I$$

kde Q_{VO_2} značí objemový průtok vzduchu (Nl·min⁻¹). Minimální průtok vzduchu musí být:

$$Q_{Vvzduc h} \geq 1 \cdot n$$

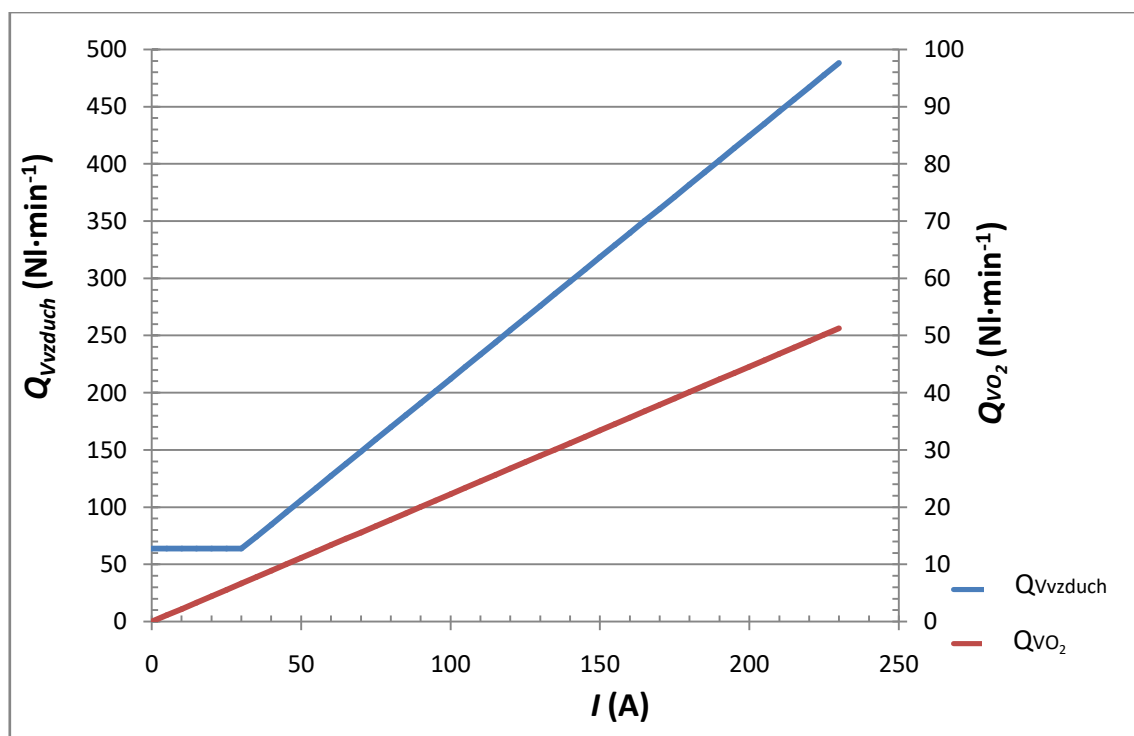
Průběhy spotřeby kyslíku a vzduchu pro palivový článek FCS 8-XXL v závislosti na jeho zatížení jsou na obr. 41.

Množství vyprodukované vody na straně katod během provozu modulu palivových článků lze vypočítat pomocí vztahu:

$$Q_{H_2O} = 0,336 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot I$$

kde Q_{H_2O} je množství vzniklé vody (l·h⁻¹), n počet článků v sérii (-) a I proud palivového článku (A).

Modul palivových článků FCS 8-XXL vyprodukuje při plném zatížení 230 A zhruba 4,95 l vody za hodinu.



Obr. 41 – Spotřeba kyslíku a vzduchu pro modul FCS 8-XXL

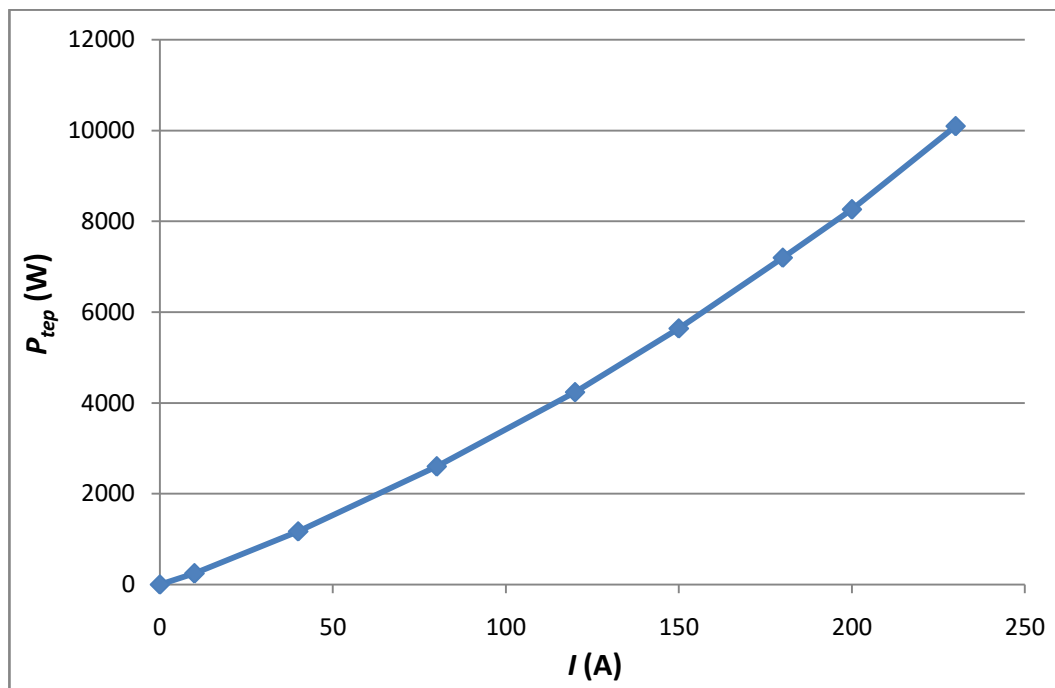
Zde uvedené charakteristiky spotřeby vodíku a kyslíku již byly v minulosti ověřovány, s uvedenými vzorci se plně shodují

4.1.1.4 Množství vyprodukovaného odpadního tepla

Palivové články kromě elektrické energie produkují také nezanedbatelné množství tepla, které lze vypočítat následovně:

$$P_{tep} = I \cdot \left[1,23 - \left(\frac{U_{mod}}{n} \right) \right] \cdot n$$

kde P_{tep} je tepelný výkon (W), I odebíraný proud (A), U_{mod} napětí modulu (V), n počet článků.



Obr. 42 – Závislost tepelného výkonu modulu FCS 8-XXL na odebíraném proudu (výpočet na základě naměřené polarizační charakteristiky)

Tepelný výkon každého z modulů FCS 8-XXL dosahuje při jmenovitém zatížení 230 A hodnoty zhruba 10,1 kW. To znamená, že palivový článek pracuje při plném zatížení s účinností horší než 50 % (okolo 44 %).

4.1.2 Systémy zajišťující chod palivových článků

4.1.2.1 Systém přívodu paliva

Pro správnou funkci modulu palivových článků je nutné zajistit při jeho provozu neustálý přísun vodíku v množství adekvátním jeho zatížení. Bez přívodu vodíku na stranu anody palivových článků nesmí být modul zatěžován.

Vodík je dodáván z velkokapacitních svazků tlakových lahví, které se nacházejí ve venkovním zastřešeném skladu plynů. Soustava ventilových, rozváděcích a regulačních panelů je vybavena tlakoměry a průtokoměry, jejichž aktuální hodnoty jsou dálkově přenášeny do řídicího systému laboratoře a umožňují obsluhu ovládání a regulování celého systému v reálném čase. Obsluha pomocí vizualizačního programu na ovládací počítačové stanici, nacházející se v dohledové místnosti laboratoře, provádí dálkové otevření příslušných ventilů plynových rozvodů a regulaci přetlaku a průtoku vodíku. Regulace musí být provedena tak, aby hodnoty tlaku a průtoku odpovídaly zatížení palivových článků.

4.1.2.2 Systém přívodu zvlhčeného reakčního vzduchu

Pro svůj provoz vyžaduje modul palivových článků okysličovadlo (vzdušný kyslík), o jehož přísun na stranu katody se stará systém sestávající z kompresoru (dmychadla), nasávajícího přes soustavu filtrů okolní vzduch z laboratoře a potrubí, které jej přivádí na vstup příslušného modulu. Nutno podotknout, že každý z pěti modulů má svůj vlastní kompresor.

Vzduch musí být před vstupem do modulu zvlhčen (80 % relativní vlhkosti), což je zajištěno zvlhčovací jednotkou, která pomocí dvou trysek vstřikuje vodu do proudu přiváděného vzduchu. Množství a intervaly vstřikované vody jsou dány nastavením obsluhy, respektive řídicím systémem. Dodávka vody ve zvlhčeném vzduchu je nezbytná pro správnou funkci polymerní membrány, u níž by jinak došlo k vysušení a následnému zničení, čímž by byl daný palivový článek, potažmo celý modul, vyřazen z provozu.

Výkon (otáčky) kompresoru jsou řízeny frekvenčním měničem na základě řídicího signálu. Informace o průtoku reakčního vzduchu a jeho teplotě jsou zprostředkovány pomocí soustavy teplotních čidel a průtokoměrů s vazbou na měřicí a řídicí systém laboratoře.

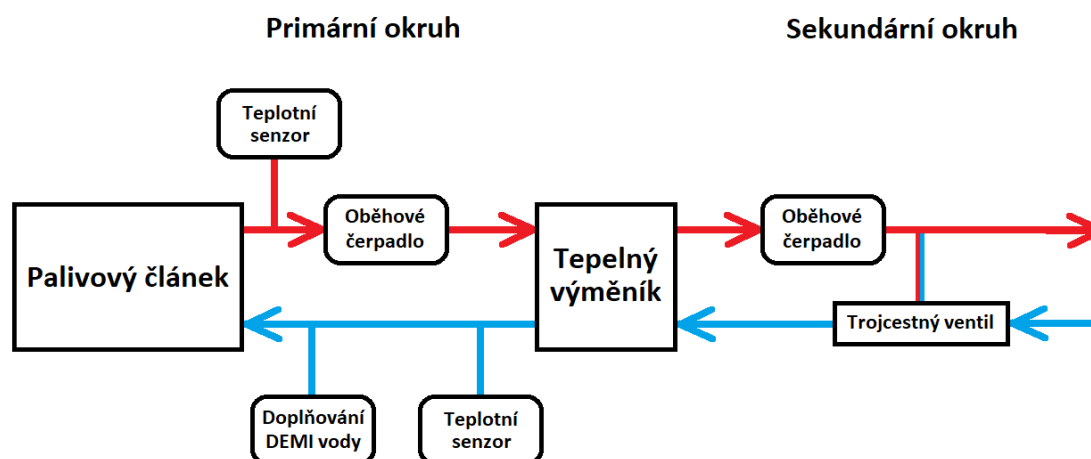
4.1.2.3 Systém vodního chlazení

Modul palivových článků Nedstack FCS 8 – XXL produkuje při svém provozu kromě elektrické energie a vody (až 4,9 l/hod) také teplo (až 14 kW_t), které je primárně odváděno prostřednictvím vodního chladicího okruhu (sekundárně také prostřednictvím reakčního vzduchu). V rámci budovy laboratoří TCO Vítkovice je toto nízkopotenciální teplo dále využíváno pro účely ohřevu TUV.

Vzhledem k požadované provozní teplotě modulu je v chladicím okruhu udržován teplotní spád v rozmezí 60 °C až 65 °C. Tento okruh sestává ze dvou částí, tlakově oddělených deskovým tepelným výměníkem. V primární části okruhu na straně modulu, která je tvořena dálkově ovládaným

oběhovým čerpadlem, potrubím, ventily, přívodem pro případné doplnění chladicího média a teplotními senzory, proudí demineralizovaná (demi) voda o měrné vodivosti maximálně $10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Sekundární část okruhu (za tepelným výměníkem) je skrze trojcestný ventil připojena na tzv. stratifikační zásobník, z něhož je teplá voda odebírána za účelem využití v budově laboratoří. Blokové schéma vodního chlazení modulu palivových článků je na obr. 43.



Obr. 43 – Blokové schéma systému chlazení modulu palivových článků

4.1.2.4 Systém tzv. profuku palivových článků

Při provozu palivových článků dochází k postupnému zanášení anodové části polymerní elektrolytické membrány produkty elektrochemických reakcí (zejména vodou, respektive vlhkostí), což má za následek pokles napětí jednotlivých článků a tedy i výstupního elektrického výkonu celého modulu.

Aby mohl modul dodávat konstantní výkon, je nutné v pravidelných, na jeho aktuálním výkonu závislých časových intervalech, provádět tzv. profuk. Ten spočívá v krátkém otevření ventilu na výstupní anodové straně palivových článků, čímž dojde k odplavení nežádoucích látek z anodové oblasti nárazovým proudem plynného vodíku do odtlakovacího potrubí vedoucího mimo laboratoř.

Z ekonomických důvodů se doporučuje tento anodový výstup vybavit rekuperací (recirkulací) vodíku z profuku, který se tímto dostane zpět na anodový vstup a je modulem znovu využit (po nutném vyčištění a zbavení vlhkosti).

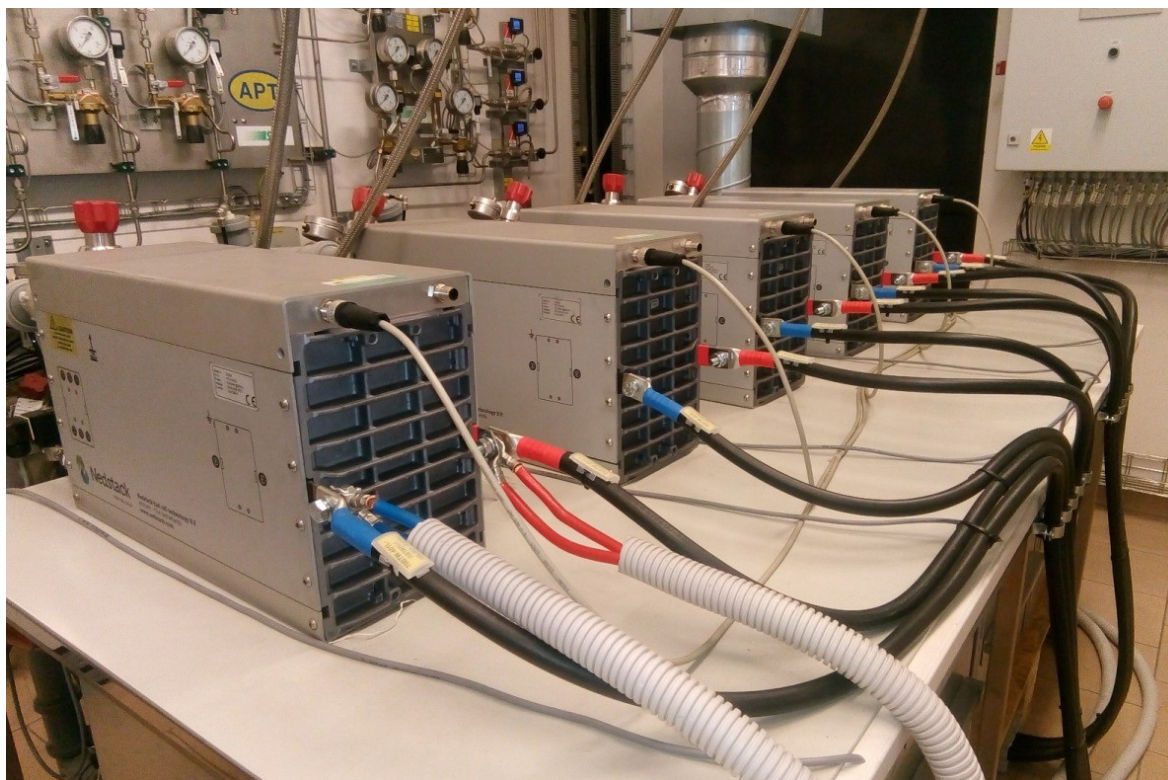
4.1.2.5 Systém vyvedení elektrického výkonu

V rámci budovy laboratoří TCO Vítkovice je možné elektrický výkon z modulů palivových článků dodávat skrze vazební měnič do lokální elektrické sítě a dotovat tak spotřebu elektřiny v tomto výzkumném centru. V případě přesného měření základních provozních charakteristik lze elektrický výstup modulů palivových článků připojit na elektronicky řízenou DC zátěž (typ EL 9400 – 150 HP).

Co se týče vazebního měniče, jedná se o třífázový měnič, který poskytuje řídicímu systému laboratoře informace o proudu v jednotlivých větvích, o napětí a proudu v meziobvodu měniče, o průtoku chladiva (chlazení měniče je zajištěno vodou) a o teplotách řídicího systému a tranzistorů včetně stavů měniče. Ovládání měniče je zajištěno pomocí dvou parametrů, a to obsluhou požadovanou hodnotou proudu odebíraného z modulů palivových článků a parametrem sloužícím pro zapnutí/vypnutí měniče.

4.1.2.6 Řídicí systém laboratoře

Řídicí systém celého výzkumného centra TCO Vítkovice má distribuovanou hierarchickou strukturu, což znamená, že řízení celého centra je rozděleno mezi více programovatelných logických automatů (PLC), které jsou ethernetovou sítí propojené s nadřazeným PLC. To je propojeno na PC server centra, na němž „běží“ OPC server. Na ten je dále navázán vizualizační systém, který například v rámci laboratoře vodíkových technologií zobrazuje na počítačové obrazovce v dohledové místnosti (dozorně) veškerá technologická schémata této laboratoře a umožňuje dálkové ovládání aktivních prvků těchto technologií. Zmíněná PLC se nachází v řídicí místnosti centra (energetický velín) v rozvodných skříních, kde je umístěn i switch a server s diskovým polem. V těchto skříních se dále nachází i dva převodníky z rozhraní Profibus na rozhraní RS485.



Obr. 44 – Pohled na moduly palivových článků ze strany elektrických vývodů

4.1.3 Rozvaděče v laboratoři a jejich přístrojové vybavení

V laboratoři vodíkových technologií se nachází několik rozvaděčů, které slouží pro její bezproblémový chod. Za účelem budoucího stěhování laboratoře do nových prostorů a její modernizace, jsem vytvořil přehled rozvaděčů, které náleží k laboratoři, včetně jejich vybavení. Podrobný soupis, spolu s fotografiemi je součástí přílohy této diplomové práce.

Tab. 6 – Seznam rozvaděčů v laboratoři

Rozvaděč:	Popis:
+70 BJS - 1	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 1
+70 BJS - 2	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 2
+70 BJS - 3	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 3
70 BJS – ZSA01	Zásuvková skříň
70 BJS – ZSA02	Zásuvková skříň
+90BJS-MX1	Svorková skříň
+90BJS-MX2	Svorková skříň
+90BJS-MX3	Svorková skříň
70 BRJ 01 (CU101)	MaR - Řídicí jednotka zdrojové stanice vodíku
70 BRJ 02 (CU102)	MaR - Řídicí jednotka vodíkového hospodářství
70 BRJ 03 (CU103)	MaR - Řídicí jednotka měření koncentrace plynů
+RM1	Rozvaděč kompresorů
81 BHA 01	Rozvaděč chladicích okruhů

Hlavní rozvaděč +70 BJS je rozdělen do tří polí. První pole obsahuje nezbytné jištění zásuvkových obvodů, vzduchových kompresorů, podružných rozvaděčů atd. Hlavním vybavením rozvaděče +70 BJS – 1 jsou jističe, proudové chrániče a stykače. Pole č. 2 slouží k jištění elektrolyzérů, třetí pole rozvaděče +70 BJS – 3 obsahuje výkonové pojistky pro jištění palivových článků a také výkonové stykače pro vyvedení výkonu z laboratoře.

Zásuvkové skříně umožňují připojení různých spotřebičů během prací v laboratoři, obsahují jak běžné zásuvky na 230 V, tak i několik trojfázových zásuvek na 400 V. Svorkové skříně slouží pro přehledné pospojování kabelů.

Rozvaděč 70 BRJ 02 (CU102) slouží pro vodíkové hospodářství, obsahuje decentrální periferii jako součást řídicího systému laboratoře. 70 BRJ 03 (CU103) je důležitý rozvaděč obsahující moduly pro detekci případného úniku plynů (vodík, resp. kyslík). Čidla pro detekci jsou umístěny v místnosti s palivovými články.

Rozvaděcí skříň +RM1 obsahuje frekvenční měnič pro kompresory vzduchu pro palivové články a příslušné stykače spolu s jištěním. Pomocí tohoto měniče jsou regulovány otáčky kompresorů jednotlivých modulů palivových článků.

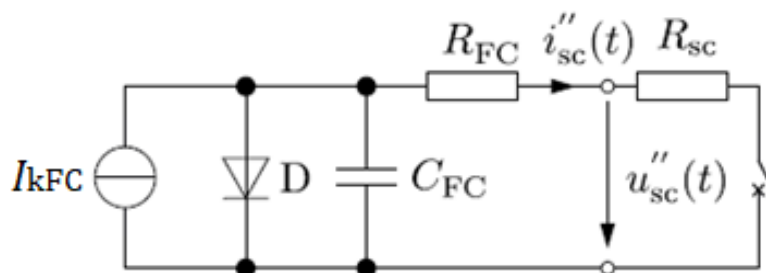
Rozvaděč 81 BHA 01 slouží pro vodní chladicí okruhy. Je společný jak pro vodní chlazení výkonových měničů, tak i pro chlazení palivových článků v laboratoři. Jeho součástí je decentrální periferie a frekvenční měnič.

4.2 Simulace průběhu zkratového proudu palivového článku Nedstack FCS 8-XXL

Jelikož by měření reálného průběhu zkratového proudu na modulu palivových článků bylo s ohledem na možnost jeho poškození či dokonce zničení příliš riskantní, rozhodl jsem se provést pouze jeho simulaci. Výsledky této simulace nelze brát jako exaktní, jedná se pouze o jakési ověření funkčnosti náhradního schématu a výpočtových vztahů.

Moduly palivových článků Nedstack FCS 8 - XXL již byly představeny v předchozí části. Jako podklad pro simulaci jsem vycházel z hodnot uvedených v katalogu a manuálu k tomuto modulu a také z literatury. K samotné simulaci jsem využil prostředí Simulink Simscape.

Jmenovitá hodnota proudu má hodnotu 230 A, maximální zkratový proud uvedeného palivového článku může dle výrobce přesahovat 300 A. Pro výpočet tedy volím hodnotu 350 A, což je zhruba o polovinu více než jmenovitý proud. Velikost špičkového zkratového proudu i_p uvažuji jako hodnotu pětinasobku jmenovité hodnoty, což je 1150 A. Tato hodnota je pouze odhad na základě literatury, skutečná hodnota se může lišit dle aktuálního provozního režimu palivového článku.



Obr. 45 – Výchozí schéma pro simulaci [18]

Pro simulaci jsem využil náhradní schéma z obr. 45. Ustálený zkratový proud je ve schématu reprezentován proudovým zdrojem. Dioda je použita v analogii s fotovoltaickým článkem, její použití je nutné kvůli proudovému zdroji. Napětí diody je zvoleno shodné, jako napětí v okamžiku zkratu (34,8 V). Kondenzátor C_{FC} představuje kapacitu palivového článku, R_{FC} vnitřní odpor palivového článku a R_{sc} vnější odpor zkratového obvodu.

Hodnota proudu I_{kFC} je rovna hodnotě ustáleného proudu po odeznění přechodného děje, pro simulovaný palivový článek volím tuto hodnotu již zmíněných 350 A. Pro simulaci uvažuji, že palivový článek byl před okamžikem zkratu zatížen na jmenovitý výkon.

Celá simulace vychází z již zmíněné rovnice, přechodný děj začíná okamžikem zkratu ($t=0$):

$$i''_{sc}(t) = \frac{U_{FC(t=0)}}{R} \cdot e^{-\left(\frac{t}{R \cdot C_{FC}}\right)} + I_{kFC} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{R \cdot C_{FC}}\right)}\right]$$

Kde lze zkratový odpor R lze vypočítat jako:

$$R = R_{FC} + R_{sc}$$

Odpor zkratového obvodu R_{sc} pro výpočet zanedbávám (jedná se o případ zkratu na svorkách palivového článku), a proto $R = R_{FC}$.

Odpor palivového článku R_{FC} lze vypočítat (v okamžiku zkratu):

$$R_{FC} = \frac{U_{FC(t=0)}}{i_p}$$

kde i_p je špičková hodnota zkratového proudu. Tuto hodnotu jsem zvolil jako pětinasobek jmenovitého proudu, tedy 1150 A. Napětí před zkratem má jmenovitou hodnotu 34,8 V. Výsledná hodnota odporu je pak rovna:

$$R_{FC} = R = \frac{34,8}{1150} = 0,03026 \, \Omega$$

Jelikož je palivový článek před zkratem zatížen, je nutné vypočítat zátěžový odpor R_{zat} . Ten lze vypočítat z proudu a napětí zátěže. Odpor R_{zat} má tedy při jmenovitém výkonu hodnotu:

$$R_{zat} = \frac{U_N}{I_N} = \frac{34,8}{230} = 0,1513 \, \Omega$$

Hodnotu kapacity palivového článku lze získat při skutečném měření z časové konstanty τ . Časová konstanta se vypočítá:

$$\tau = R \cdot C_{FC}$$

Nutno poznamenat, že časová konstanta τ je doba, za kterou přechodná složka zkratového proudu dosáhne hodnotu rovnu $1/e$ (cca 0,37) násobku vrcholové hodnoty. K ustálení přechodného děje dochází zhruba za dobu 5τ .

Z hodnoty časové konstanty lze pak při známém odporu R vypočítat kapacitu palivového článku:

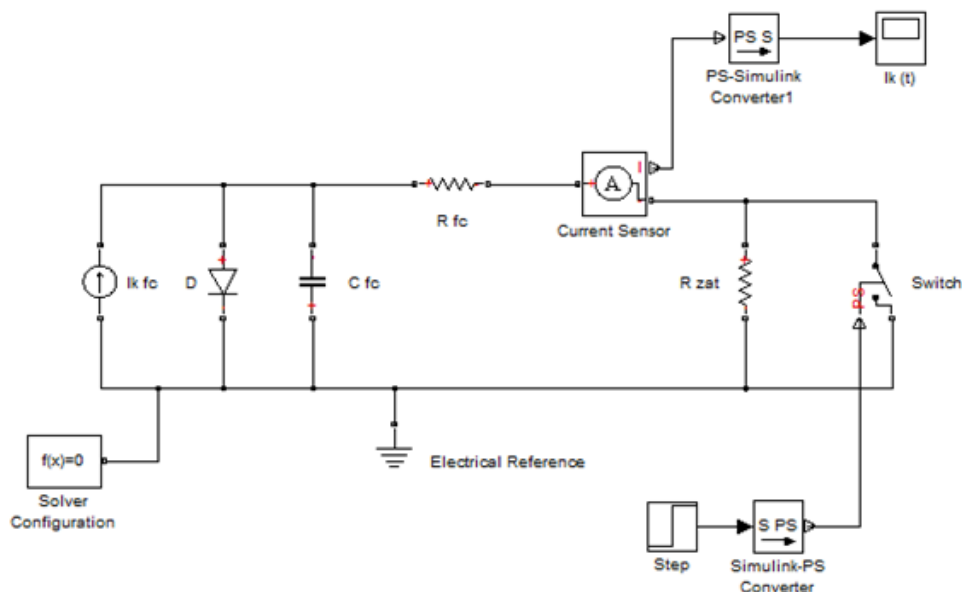
$$C_{FC} = \frac{R}{\tau}$$

Jelikož v tomto případě hodnota C_{FC} není známa, byla provedena simulace pro několik hodnot kapacity (0,5 F, 1 F, 2 F a 5 F). Obvykle bývá velikost kapacity palivového článku v nižších jednotkách faradů.

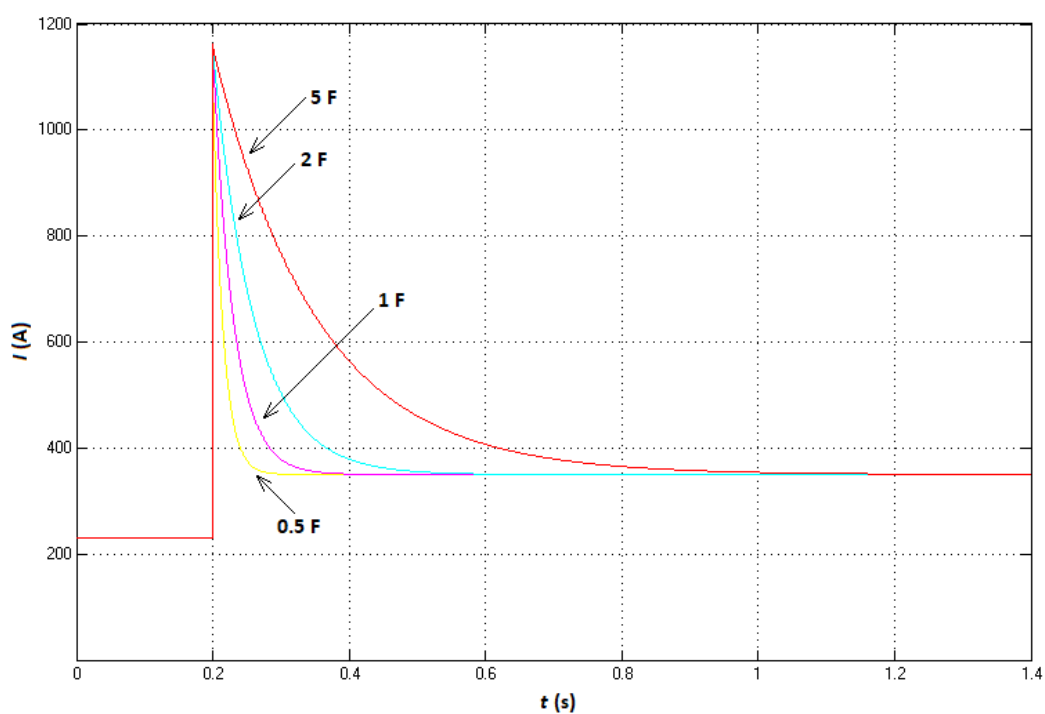
Tab. 7 – Základní parametry pro simulaci

R_{zat}	0,1513 Ω
R	0,03026 Ω
I_{kFC}	350 A

Ve schématu vytvořeného v prostředí Simulink (obr. 46) mají všechny prvky v obvodu vlastnosti ideálních součástek. To znamená, že jejich odpory jsou nulové (např. odpor spínače či odpor diody), případně nekonečně velké (svodový odpor kondenzátoru).



Obr. 46 – Schéma vytvořené v prostředí Simulink

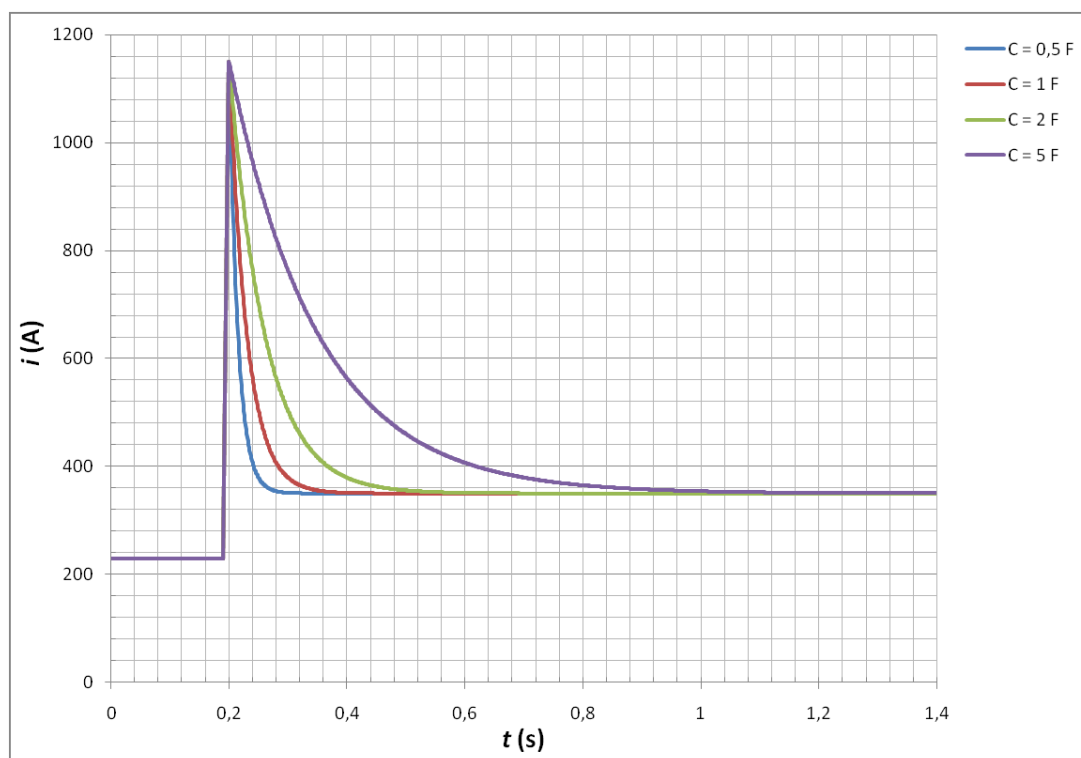


Obr. 47 – Výsledné časové průběhy zkratového proudu pro různé velikosti kapacity ($C_{FC} = 0,5 \text{ F}, 1 \text{ F}, 2 \text{ F}$ a 5 F)

Okamžik zkratu palivového článku je v čase 0,2 s. Z výše uvedených průběhů provedené simulace (obr. 47) je patrné, že velikost kapacity palivového článku nemá vliv na špičkovou hodnotu zkratového proudu i_p , ale pouze na dobu ustálení přechodného děje. Čím větší hodnota kapacity palivového článku, tím je doba ustálení delší. Při uvažované hodnotě kapacity 0,5 F dochází k ustálení zkratového proudu za cca 0,1 s. V případě desetinásobné kapacity (5 F) je tato doba desetinásobná (cca 1s).

Kapacita palivového článku závisí na mnoha faktorech. Její velikost lze získat buď ze skutečného měření zkratového průběhu a následného výpočtu, anebo měřením (např. impedanční spektroskopie).

Správnost provedené simulace jsem ověřil výpočtem časového průběhu zkratového proudu podle rovnice. Výpočet jsem provedl v tabulkovém procesoru (Excel).

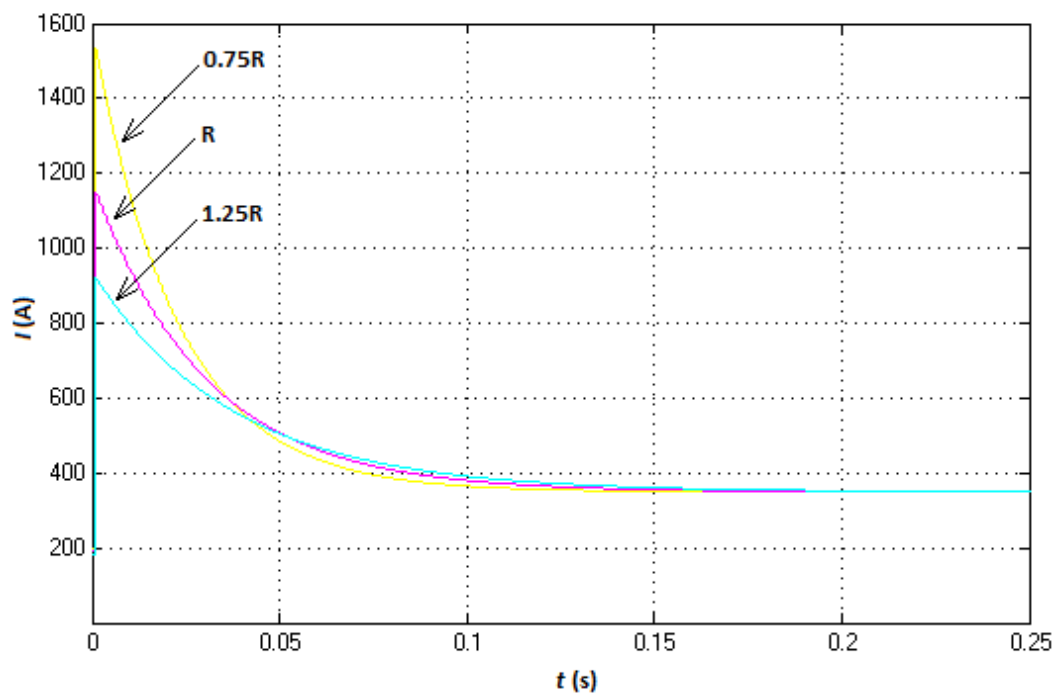


Obr. 48 – Časové průběhy zkratového proudu vypočtených v tabulkovém procesoru

Ze srovnání průběhů na obr. 47 a obr. 48 je vidět, že jak simulované, tak i vypočtené průběhy zkratových proudů jsou shodné.

Na obr. 49, který je na další straně, jsou zobrazeny časové průběhy zkratového proudu při různě zvolených hodnotách vnitřního odporu palivového článku a konstantní kapacitě. Základní hodnota odporu R je zvolena $0,03026 \, \Omega$, tedy stejná jako v předešlém případě, další dvě hodnoty jsou $0,75 \, R$ a $1,25 \, R$.

Hodnota vnitřního odporu palivového článku se mění se změnou provozního režimu (např. vliv vlhkosti membrány nebo vliv teploty), jeho velikost závisí také na aktuálním zatížení. Pokud je palivový článek před zkratem zatížen minimálně, jeho vnitřní odpor bude menší, a tím bude špička zkratového proudu větší než v případě většího zatížení.



Obr. 49 – Průběhy zkratového proudu při změně odporu palivového článku
(konstantní kapacita $C_{FC} = 1 \text{ F}$)

Z průběhů lze vypožorovat, že změna hodnoty odporu má za následek nejen změnu špičkové hodnoty zkratového proudu, ale i vliv na dobu trvání přechodného děje. S klesajícím odporem se přechodný děj ustálí za kratší čas.

Během výpočtů jsem se dopustil mnohých zjednodušení a odhadů, proto bude vhodné v budoucnu ověřit výsledky této simulace reálnými naměřenými hodnotami. Nicméně tvar přechodného děje by měl souhlasit se simulovanými výsledky.

4.3 Možnosti ochrany palivových článků

Pojem ochrana palivových článků lze vyložit více způsoby. Jednak je nutné dbát na kvalitu vstupujících reaktantů, tedy zabránit vstupu paliva s velkým obsahem příměsí jako je zejména oxid uhelnatý či jiné nevhodné sloučeniny. Reakční vzduch také musí splňovat určité parametry, jinak by mohlo dojít třeba k zanesení membrány nečistotami. Velmi důležitý parametr, kterému je zapotřebí věnovat pozornost, je také tlak vstupujících reaktantů. Při překročení maximálního tlaku či povoleného rozdílu tlaků na straně anody a katody může dojít k mechanickému zničení membrány a následnému znemožnění dalšího provozu.

V neposlední řadě je také potřeba palivové články chránit z hlediska elektrického přetížení, zkratu anebo také zpětného toku výkonu či přepólování. Tyto zmíněné nestandardní provozní stavy mají za následek zvýšení teploty celého modulu a mohou vyústit zničením palivových článků. Proto je nutné nepodcenit chránění palivových článků také v této oblasti.

Ochranu palivových článků z hlediska zkratu a přetížení je možno provést mnoha způsoby. Nejjednodušší ochranou při zkratu jsou pojistky, případně jističe. Jelikož ale zkratový výkon palivových článků nedosahuje velikosti zkratových výkonů točivých strojů či transformátorů, nemusí být tento způsob ochrany vždy dokonale spolehlivý.

Elektrický zkrat je obvykle spojen s prudkým nárůstem proudu, ovšem dochází během něj také k poklesu napětí. Jako zajímavější se proto jeví použití nadproudové ochrany v kombinaci s detekcí podpětí. Ještě kvalitnějšího chránění by se dalo docílit doplněním o měření celkové teploty modulu palivových článků. Tento způsob ochrany již vyžaduje součinnost s řídicím systémem, zato však poskytne mnohem dokonalejší chránění a může prodloužit výslednou životnost celého energetického systému.

4.3.1 Pojistky

Pojistky představují nejjednodušší způsob chránění proti nadproudům. Základní princip pojistek spočívá v záměrném vytvoření nejslabšího místa v elektrickém obvodu. V případě překročení jmenovitého proudu pojistky se přetaví tavný drátek a tím dojde k odpojení chráněného zařízení. Mezi přednostmi pojistek patří zejména spolehlivost a omezovací schopnost. Nevýhodou je, že po každém zapůsobení pojistky je nutno ji nahradit novou.

Z důvodu nízkých hodnot zkratových proudů palivových článků, které dosahují velmi malých násobků jmenovité hodnoty, je nutno věnovat velkou pozornost výběru vhodné pojistky. Při špatně zvolené pojistce se může stát, že při zkratu nedojde k vybavení, čímž může nastat riziko zničení palivového článku. Vhodně zvolená pojistka dokáže odpojit zkratový obvod v relativně krátkém čase, kdy nemusí dojít k žádným škodám. V případě vybavení pojistek dojde k prudkému odlehčení palivového článku, a proto musí současně dojít k zastavení přívodu reaktantů.

Jiná situace nastává pro případ přetížení. Vzhledem k tomu, že maximální proud palivového článku není o moc větší než jmenovitý, pojistky nejsou schopny včas odpojit přetížený palivový článek. Oblast, při které začíná pojistka působit, se nachází až při 1,2 – 1,5 násobku své jmenovité

hodnoty, proto k vybavení dojde až za dlouhou dobu, v nejhorším případě vůbec. Pojistky je proto vhodné použít jako doplňkovou ochranu při zkratu.

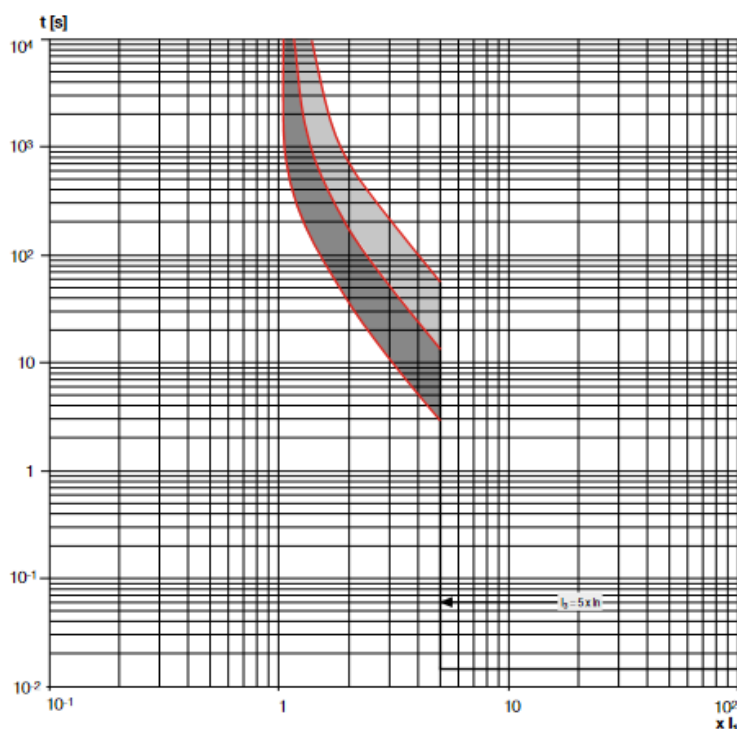
4.3.2 Jističe

Jističe mají oproti pojiskám výhodu opětovného použití po zapůsobení. Na druhou stranu mohou mít menší omezovací schopnost.

Obvyklé jističe jsou vybaveny dvěma druhy spouští. První spouští je spoušť tepelná, která je ve formě bimetalového prvku, který je zahříván průchodem proudu. Pokud jeho teplota dosáhne určité meze, dojde k vybavení jističe. Tato spoušť má zpravidla delší dobu působení, doba vypnutí je závislá na velikosti protékajícího proudu. Z toho plyne, že větší nadproudy jsou touto spouští vypínány v kratším čase. Druhá spoušť je zkratová, ta je tvořena elektromagnetem. Zkratová spoušť působí až při vyšších násobcích jmenovitého proudu, doba vypnutí je však nezávislá na velikosti proudu.

Při použití jističů k chránění palivových článků nastává opět stejná situace jako u pojistek. Náhlý zkrat může být odpojen v relativně krátkém čase, ale přetížení palivového článku nemusí být vůbec detekováno.

Vhodným kandidátem pro chránění palivových článků při zkratu jsou jističe T4N-PV/E z řady jističů Tmax PV od firmy ABB. Tyto jističe jsou určeny pro chránění fotovoltaických elektráren do napětí 1500 V DC. Vyrábějí se v rozsahu jmenovitých proudů 100 - 250 A a jsou vybaveny tepelnou a magnetickou spouští, kdy magnetická spoušť má pevně nastavenou hodnotu na pětínásobek jmenovité hodnoty proudu (obr. 50).



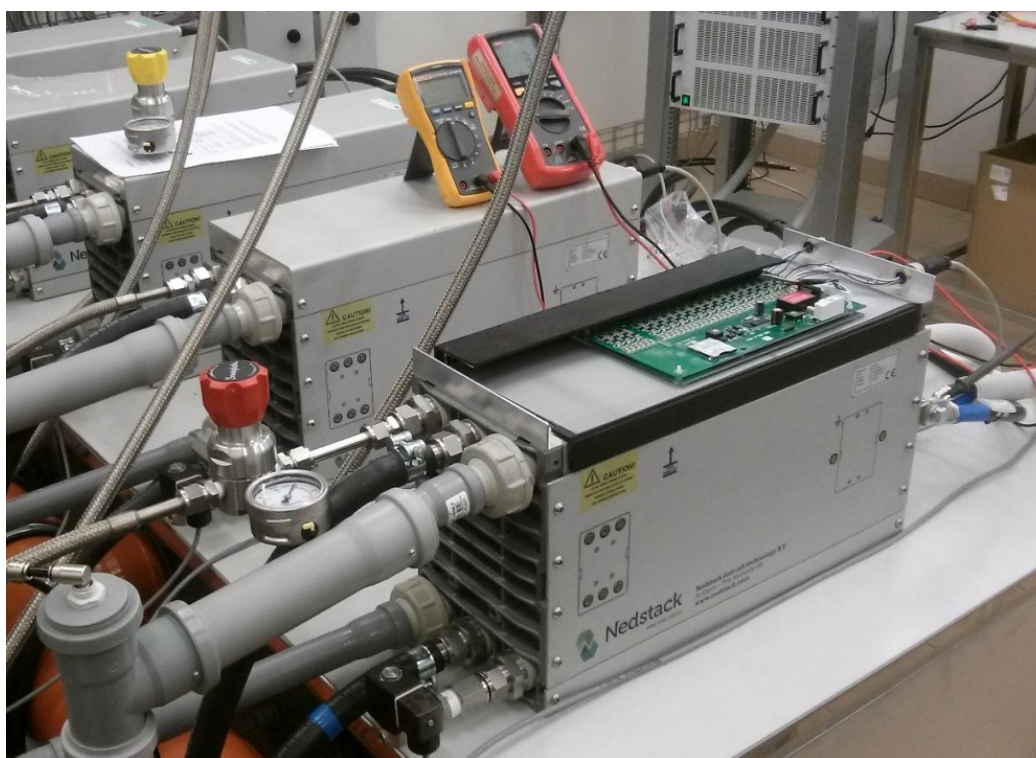
Obr. 50 – Vypínací charakteristika jističe Tmax PV - T4N-PV/E [35]

4.3.3 CVM - Control Voltage Monitor

Velice důležitou součástí systému chránění palivových článků může být zařízení pro monitorování napětí jednotlivých článků (CVM – Control Voltage Monitor). Některé palivové články mají již takový modul integrovaný, poté jenom stačí palivový článek propojit skrze vhodnou sběrnici k řídicímu systému.

Hodnoty napětí na jednotlivých článcích jsou velice důležitým ukazatelem provozního stavu celého systému. Pokud dojde k jakékoliv poruše, ať už se jedná například o zkrat nebo třeba jen nedostatečné zvlhčení membrán, řídicí systém může díky znalosti jednotlivých napětí provést patřičný zásah a předejít tak možným škodám.

Palivové články nacházející se v laboratoři jsou již CVM systémem vybaveny (obr. 51). Napětí je pomocí desky, která je vestavěna uvnitř, měřeno a zpracováváno v reálném čase. Komunikace s řídicím systémem probíhá přes sběrnici CAN prostřednictvím pěti pinového průmyslového konektoru M12. Kromě samotné sběrnice CAN, která je dvou vodičová, konektor slouží zároveň i k napájení celé desky z externího zdroje. Mimo to je deska vybavena také druhým konektorem M12, který je čtyř pinový a slouží pro spínání alarmu při poruše palivového článku. V současné době není tento konektor v laboratoři využitý.



Obr. 51 – Modul palivových článků v laboratoři s viditelnou interní deskou určenou pro měření napětí

Modul má rozsah měřených napětí od -0,15 V do 1,1 V na článek s přesností 10 mV. Napájecí napětí musí být v rozsahu 18 – 32 V DC, výkon odebíraný modulem se pohybuje okolo 0,5 W.

Některé moduly palivových článků nedisponují vestavěným CVM modulem pro monitorování napětí, v takovém případě jsou obvykle jen vyvedeny konektory k připojení externího zařízení určeného k vyhodnocování dílčích napětí palivového článku.

Jedním z mnoha použitelných externích monitorovacích zařízení může být i zařízení „DiLiCo CELL VOLTAGE“ od stejnojmenné firmy DiLiCo. Tento modul se vyrábí ve dvou variantách a to pro měření až 48 nebo 96 článků. Kromě monitorování palivových článků může také sloužit pro monitorování elektrolyzérů nebo souborů akumulátorů.



Obr. 52 – Zařízení DiLiCo CELL VOLTAGE (varianta pro 48 článků) [27]

Toto zařízení je schopno v reálném čase sledovat a vyhodnocovat jednotlivá napětí měřeného palivového článku. Napětí, která přístroj umožňuje zpracovat, leží v rozsahu 0 – 4,5 V. Časové intervaly mezi měřeními jsou 20 ms u 48 kanálové varianty nebo 34 ms u 96 kanálové varianty.

Připojení k palivovému článku je provedeno prostřednictvím 50 pinového D-SUB konektoru, respektive dvojicí těchto konektorů u varianty pro 96 článků). Komunikace s řídicím systémem pak probíhá dle výběru buď po sběrnici RS232, CAN nebo USB. Napájení modulu je zajištěno externím 24V zdrojem.

4.3.4 Digitální nadproudové ochrany

Digitální nadproudové ochrany se jeví jako nejideálnější řešení, umožňují plynulé nastavení velikosti vypínacích proudů jak při zkratu, tak i při přetížení a dokážou reagovat velmi rychle. Pro případy zkratu je vhodné použití nadproudové ochrany v kombinaci s podpětovou spouští, jelikož napětí v okamžiku zkratu obvykle prudce poklesne.

Realizovat chránění palivových článků pomocí digitálních ochran je v současné době obtížné, protože na trhu není zatím dostupný vyhovující model ochrany určený pro stejnosměrné aplikace. Jednou z možností, jak se vypořádat s tímto nedostatkem je návrh ochrany vytvořené pomocí vhodného PLC.

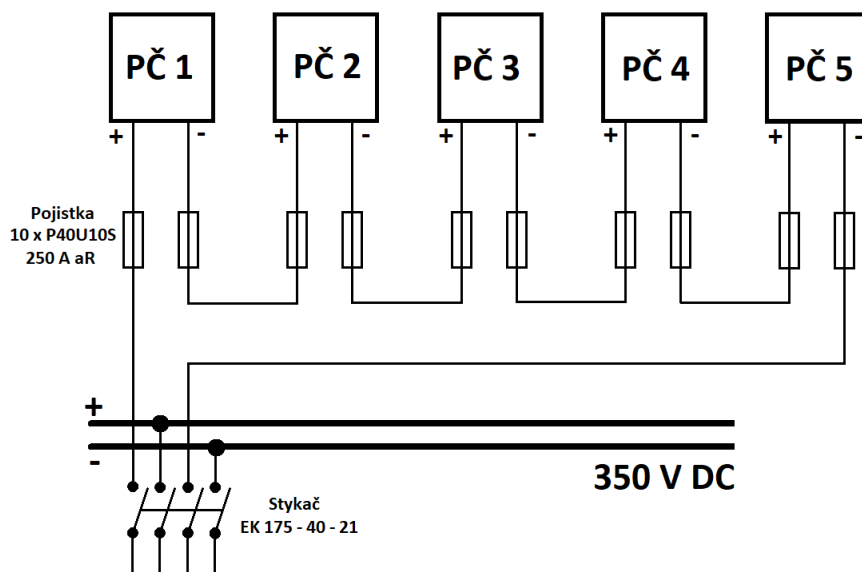
4.4 Současný způsob ochrany palivových článků v laboratoři

V současnosti je chránění palivových článků zajištěno pojistkami od výrobce OEZ typu P40U10S o jmenovité hodnotě proudu 250A s charakteristikou aR. Jedná se o rychlé pojistky pro chránění polovodičů, charakteristika aR zajišťuje chránění pouze před zkratem. Tento typ pojistky se vyznačuje nízkými hodnotami omezeného proudu a parametrem I^2t . Základní charakteristiky použitých pojistek jsou uvedeny v příloze. Pojistky jsou doplněny návěsním kontaktem, který v případě vybavení podává informaci řídicímu systému.



Obr. 53 – Pojistka P40U10S spolu s návěsním kontaktem v rozvaděči

Na obr. 54 je vidět základní elektrické schéma zapojení modulů palivových článků v laboratoři. Vyvedení elektrického výkonu každého z modulů je zajištěno měděnými vodiči o průřezu 120 mm^2 a délce zhruba 10 m do hlavního rozvaděče. Každý pól modulu má v rozvaděči svou vlastní pojistku. Moduly jsou v rozvaděči pospojovány do série, celkový výkon je pak vyveden přes výkonový stykač na přípojnici o jmenovitém stejnosměrném napětí 350 V, ze které je přes další stykače veden dále.



Obr. 54 – Schéma jištění palivových článků

Moduly palivových článků jsou rovněž vybaveny zařízením CVM, který ovšem slouží pouze pro monitorování napětí, pro účely chránění se údaje z těchto modulů nevyužívají.

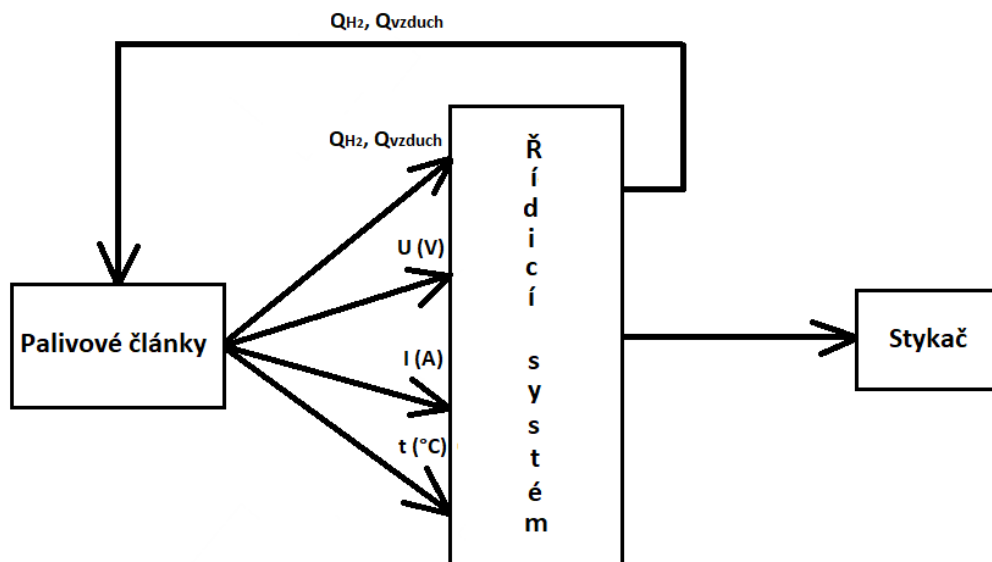


Obr. 55 – Umístění pojistek a stykačů v rozvaděči

Lze konstatovat, že během doby provozu laboratoře zatím nedošlo k žádnému zkratu ani významné poruše, a proto nelze posoudit účinnost tohoto způsobu chránění.

4.5 Možné alternativy chránění palivových článků v laboratoři vodíkových technologií

Konkrétnímu návrhu nového způsobu chránění v laboratoři se tato práce nemá za cíl věnovat, avšak je vhodné nastínit možnou variantu a dát tak prostor pro budoucí rozšíření této práce v doktorském studiu.



Obr. 56 – Blokové schéma možného způsobu chránění

Na obr. 56 je uvedeno blokové schéma, které představuje zjednodušený koncept možného způsobu chránění. Řídicí systém na základě znalosti celkového napětí, napětí jednotlivých článků, proudu, průtoku reakčních plynů a teploty vyhodnocuje a provádí zásah v případě výrazného překročení některého z parametrů. Současně s odpojováním palivových článků od zátěže musí dojít k zastavení průtoku reaktantů, čímž palivový článek přestane generovat napětí.

Závěr

Nutnost chránit palivové články v energetickém systému je velice důležitá pro jeho dlouhodobý a spolehlivý provoz. V této práci se proto snažím poukázat na možné způsoby chránění palivových článků před poruchovými proudy v kontextu s laboratoří vodíkových technologií, jenž je součástí Technologického centra Ostrava.

K chránění souboru modulů palivových článků v laboratoři jsou v současné době využívány pouze pojistky, což se jeví jako nedostatečné, proto jsem pokusil nalézt vhodný prostředek ke zlepšení bezpečnosti provozu laboratoře. Ze všeho nejdřív bylo nutné najít dostatek teoretických informací o chování palivových článků během poruchových stavů a porozumět jim.

V praktické části jsem mimo jiné provedl simulaci zkratového proudu modulu palivových článků za použití náhradního schématu. Z výsledků simulací je patrné, že velikost kapacity palivového článku nemá vliv na špičkovou hodnotu zkratového proudu, zato změna hodnoty vnitřního odporu silně ovlivňuje její maximální velikost.

Zvolit vhodný způsob chránění palivových článků je vzhledem k jejím vlastnostem problematické. Jelikož zkratové proudy palivových článků nedosahují takových velikostí jak je tomu u jiných zdrojů elektrické energie, je nutno dávat velký pozor při výběru vhodného jisticího zařízení. Pojistky a jističe představují nejjednodušší ochranu před zkratem, avšak při přetížení je jejich činnost omezená a proto je nutné zajistit i jiný druh ochrany.

Nejvhodnější je do systému chránění zařadit modul pro monitorování napětí palivových článků, díky čemuž lze zachytit poruchu v jejím počátečním stádiu a urychleně odstavit celý systém z provozu. Tyto moduly jsou obvykle zabudovány v samotném modulu palivových článků, ale existují i různá externí zařízení sloužící k tomuto účelu.

Jelikož doba, ve které tato práce vznikala, příliš nepřála osobním setkáním, nemohly být některé výsledky této práce aplikovány v praxi. Tím je ovšem dán prostor k budoucímu bádání a ověření nabytých poznatků v laboratorním provozu, čímž by mohlo dojít ke značnému vylepšení spolehlivosti celé laboratoře.

Literatura

- [1] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2
- [2] PORŠ, Zdeňek. Palivové články. Ústav Jaderného Výzkumu Řež. 2002. [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [3] O'HAYRE, Ryan P. Fuel cell fundamentals. 2nd ed. Hoboken: Wiley, c2009. ISBN 978-0470-25843-9.
- [4] Flow visualization in 3D printed PEM fuel cell bipolar plates [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-visualization-in-3D-printed-PEM-fuel-cell-Piri/97bfe973d8cc088ebf6bc7c3442bcf751cf6e855>
- [5] Vodíkové hospodářství - Česká vodíková technologická platforma. [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>
- [6] Bezpečnost - Česká vodíková technologická platforma. [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/482-bezpecnost>
- [7] Hydrogen: Clearing up the Colours | Enapter. Produce Green Hydrogen with The AEM Electrolyser, Enapter [online]. Enapter S.r.l. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.enapter.com/hydrogen-clearing-up-the-colours>
- [8] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, H.S. Ramadan, S. Fukuhara, Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell system, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 2, 2017, Pages 1534-1543, ISSN 0360-3199
- [9] D. Hissel, M. Péra, Diagnostic & health management of fuel cell systems: Issues and solutions, Annual Review in Control, 2016, 42, pp. 201 - 211.
- [10] Salim, Reem & Noura, Hassan & Fardoun, A.A.. (2013). A review on fault diagnosis tools of the proton exchange Membrane Fuel Cell. Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, SysTol. 686-693. 10.1109/SysTol.2013.6693877.
- [11] A. Mohammadi, Analysis and Diagnosis of Faults in the PEMFC for Fuel Cell Electrical Vehicles, Thèse de Doctorat, 2014
- [12] Horák, B. a kol.: Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem, Ostrava, 2005
- [13] NGUYEN DUC, Tuyen & Fujita, Goro. (2012). Modelling a SOFC Power Unit Using Natural Gas Fed Directly. 10.5772/36376.
- [14] MINAŘÍK, Daniel. *Implementace palivového článku do fotovoltaického systému* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/89629>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [15] PEM Fuel Cell. - *Home* [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z:
http://www.pfrang.de/pageID_2388563.html
- [16] Výroba vodíku - Česká vodíková technologická platforma. [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z:
<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [17] M. Schumann, F. Grumm, C. Cosse, M. Plenz and D. Schulz, "Short-Circuit Behavior of a PEM Fuel Cell Stack under Various Operating Conditions," NEIS 2020; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, 2020, pp. 1-7.
- [18] Grumm, F. a kol.: Short Circuit Characteristics of PEM Fuel Cells for Grid Integration Applications, *Electronics* 9(4):602, 2020
- [19] S. Shiva Kumar, V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Materials Science for Energy Technologies*, Volume 2, Issue 3, 2019, Pages 442-454, ISSN 2589-2991
- [20] K. Sokanský, *Palivové články v elektroenergetice*, Ostrava, 2007
- [21] Skladování vodíku I - Česká vodíková technologická platforma. [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [22] GasHub. GasHub [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.fuelcell.sg/hydrogen.php>
- [23] Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství. *tzb-Info.cz* [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7134-akumulace-energie-z-oze-vodikove-hospodarstvi>
- [24] *Manuál k modulu palivových článků Nedstack FCS 8-XXL*
- [25] N. Guerram M. Guervara, C. Palacios y F. Crupi, "Operation and Physics of Photovoltaic Solar Cells: an overview", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 14, no. 2, pp. (84-95), 2018
- [26] J. Kozumplík, *Olověné akumulátory*, 1975
- [27] Measure cell voltage for fuel cells, electrolyzers and batteries. [online]. Copyright © 2021 DiLiCo engineering GmbH. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.dilico.de/en/zellspannung.php>
- [28] Kyungsoo Lee, Youngjin Cho, Jaehyun Park, Younghyun Kim, Jihun Kim, Naehyuck Chang, A Fuel-Cell-Battery Hybrid Platform for Portable Embedded Systems, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 41, Issue 2, 2008, Pages 2188-2193, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902661005
- [29] P. Bannert, *Praktika z fotovoltaiky*, [cit. 27.04.2021], Dostupné z:
https://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf
- [30] Can capacitors be used as instantly charging batteries? - Quora. Quora - A place to share knowledge and better understand the world [online]. [cit. 27.04.2021]. Dostupné z:
<https://www.quora.com/Can-capacitors-be-used-as-instantly-charging-batteries>

- [31] Rosa Elvira Sanchez, Fabien Harel, Samir Jemei, Rafael Gouriveau, Daniel Hissel, et al.. ProtonExchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit. Fuel Cells, Wiley-VCHVerlag, 2014, 14 (6), pp.894 - 905. hal-01304007
- [32] Fuel Cell & Clean Energy Solutions | Ballard Power [online]. Copyright © [cit. 20.04.2021]. Dostupné z: https://www.ballard.com/docs/default-source/web-pdf%27s/recycling-technical-note_final.pdf
- [33] Lazarou, Stavros & Pyrgioti, Eleftheria & Alexandridis, Antonio. (2009). A simple electric circuit model for proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources. 190. 380-386. 10.1016/j.jpowsour.2009.01.065.
- [34] R.E. Silva, F. Harel, S. Jemei, Rafael Gouriveau, Daniel Hissel, et al.. Proton exchange membrane fuel cell operation and degradation in short-circuit.. 5th International Conference on Fundamentals & Development of Fuel Cells (FDFC 2013)., Jan 2013, Germany. pp.1-6. hal-00834236
- [35] SACE Tmax PV for photovoltaic applications [online]. [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/2ad881b6cb394acc9d3b9ae73d60e6ec/Final_1SXU210244C0201%20Tmax%20PV_UL.pdf

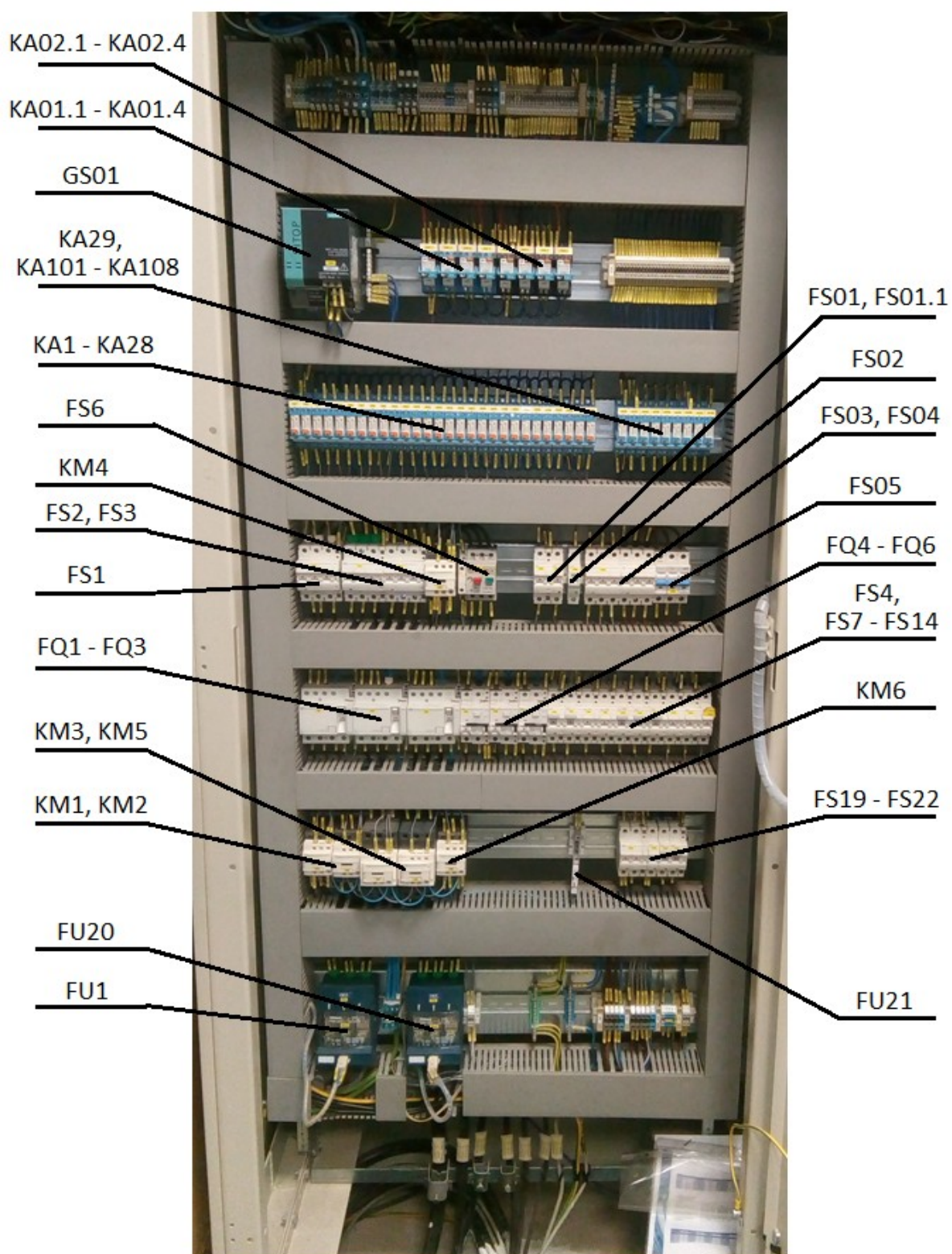
Příloha A: Soupis přístrojového vybavení rozvaděčů náležících k laboratoři vodíkových technologií

Tab. 1a – Seznam rozvaděčů

Rozvaděč:	Popis:
+70 BJS - 1	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 1
+70 BJS - 2	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 2
+70 BJS - 3	Hlavní rozvaděč silnoprůd – pole č. 3
70 BJS – ZSA01	Zásuvková skříň
70 BJS – ZSA02	Zásuvková skříň
+90BJS-MX1	Svorková skříň
+90BJS-MX2	Svorková skříň
+90BJS-MX3	Svorková skříň
70 BRJ 01 (CU101)	MaR - Řídící jednotka zdrojové stanice vodíku
70 BJR 02 (CU102)	MaR - Řídící jednotka vodíkového hospodářství
70 BJR 03 (CU103)	MaR - Řídící jednotka měření koncentrace plynů
+RM1	Rozvaděč kompresorů
81 BHA 01	Rozvaděč chladičů okruhů

+70 BJS – 1**Tab. 2a – Vybavení rozvaděče +70 BJS – 1**

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
GS01	Napájecí zdroj 10A 24V	SIEMENS	6EP1334-3BA00	1
KA01.1 - KA01.4	Relé 230 V AC, 10A + patice	FINDER	55.33.8.230.0050	4
KA02.1 -KA02.4	Relé 230 V AC, 10A + patice	FINDER	55.33.8.230.0050	4
KA1 - KA28	Relé 230 V AC, 8A + patice	FINDER	46.52.8.230.0040	28
KA29	Relé 24 V DC, 8A + patice	FINDER	46.52.9.024.0050	1
KA101 - KA108	Relé 24 V DC, 8A + patice	FINDER	46.52.9.024.0051	8
FS1	Jistič trojfázový 16 A	OEZ	LPN C16	1
FS2	Jistič trojfázový 32 A	OEZ	LPN B32	1
FS3	Jistič trojfázový 63 A	OEZ	LPN B63	1
KM4	Stykač 18 A	Schneider	LC1D18	1
FS6	Motorový spouštěč 0,4 A	OEZ	SM1-0,4	1
FS01	Jistič jednofázový 25 A	OEZ	LPN C25	1
FS01.1	Jistič jednofázový 4 A	OEZ	LPN B4	1
FS02	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPN C6	1
FS03, FS04	Jistič trojfázový 16 A	OEZ	LPN C16	2
FS05	Jistič trojfázový 10 A	SCHRACK	B10/3	1
FQ1	Proudový chránič 25A, 30 mA	OEZ	OFI-25-4-030AC	1
FQ2	Proudový chránič 40A, 30 mA	OEZ	OFI-40-4-030AC	1
FQ3	Proudový chránič 63A, 30 mA	OEZ	OFI-63-4-030AC	1
FQ4 - FQ6	Proudový chránič 16A, 30 mA	OEZ	OLI-16C-1N-030AC	3
FS4, FS7	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPE C6	2
FS8, FS9	Jistič jednofázový 10 A	OEZ	LPE C10	2
FS10, FS11	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPE C6	2
FS12	Jistič jednofázový 10 A	OEZ	LPE C10	1
FS13, FS14	Jistič jednofázový 16 A	OEZ	LPN B16	2
KM1	Stykač 18 A	Schneider	LC1D18	1
KM2	Stykač 38 A	Schneider	LC1D38	1
KM5	Stykač 65 A	Schneider	LC1D40A	1
KM6	Stykač 18 A	Schneider	LC1D18	1
FU21	Pojistka 1 A	-	-	1
FS19	Jistič jednofázový 10 A	OEZ	LPN C10	1
FS20	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPN C6	1
FS21	Jistič jednofázový 10 A	OEZ	LPE C10	1
FS22	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPE B6	1
FU1	Řadový odpínač, 80 A gG	OEZ	FH000-3S/T	1
FU20	Řadový odpínač, 50 A gG	OEZ	FH000-3S/T	1

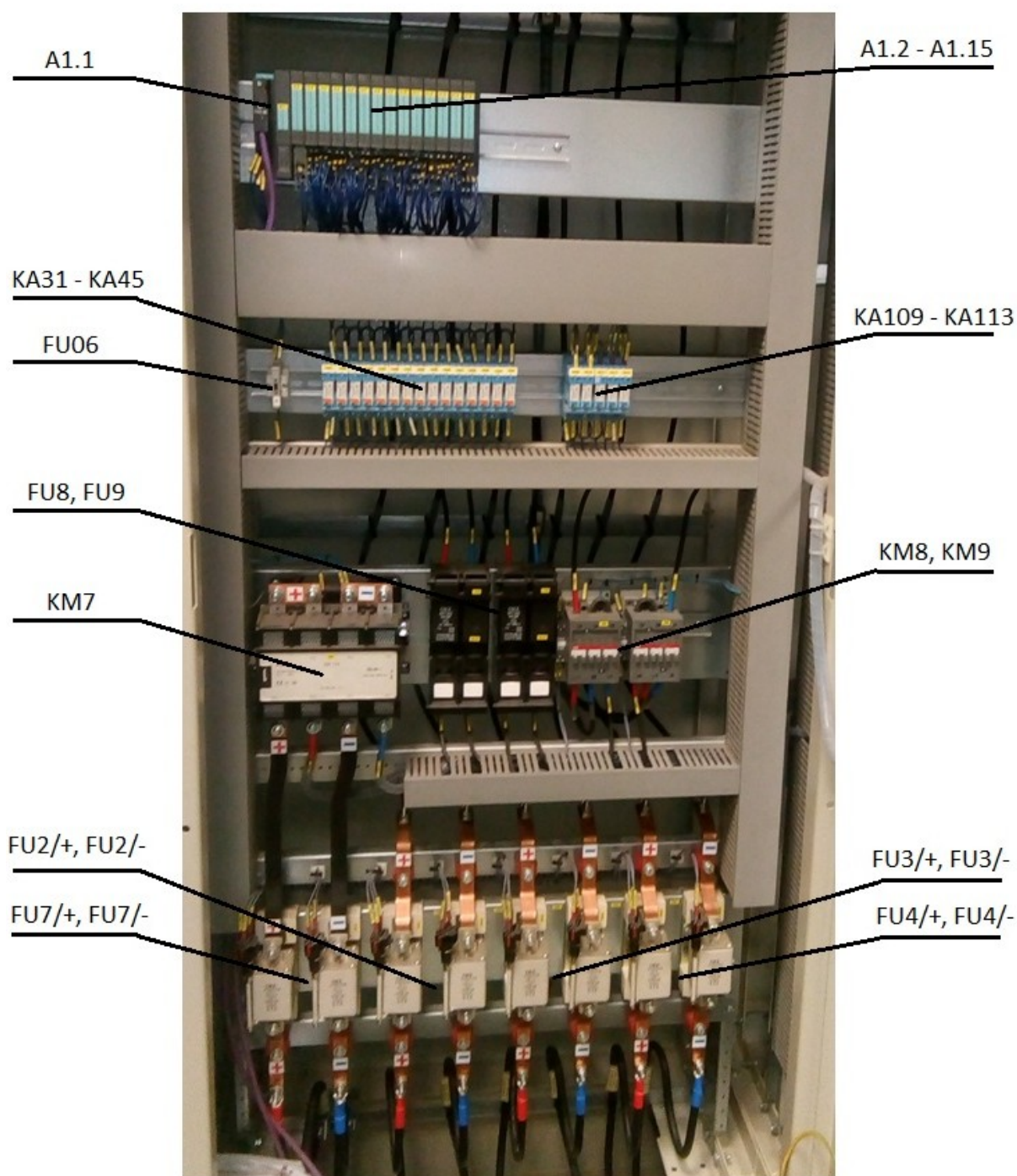


Obr. 1a – Vnitřní uspořádání rozvaděče +70 BJS – 1

+70BJS – 2

Tab. 3a – Vybavení rozvaděče +70BJS – 2

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
A1.1	ET200S IM151-1	SIEMENS	ET200S IM151-1	1
A1.2	PM-E ST, 24 V	SIEMENS	PM-E ST, 24 V	1
A1.3 - A1.11	8DI	SIEMENS	6ES7 131-4BF00-0AA0	9
A1.12 - A1.15	8DO	SIEMENS	6ES7 132-4BF00-0AB0	4
FU06	Pojistka 2,5 A	-	-	1
KA31 - KA45	Relé 230 V AC, 8A + patice	FINDER	46.52.8.230.0040	28
KA109 - KA113	Relé 24 V DC, 8A + patice	FINDER	46.52.9.024.0040	5
KM7	Čtyřpólový stykač 300 A	ABB	EK175, SK 825 440	1
FU8	Pojistkový odpojovač, 40 A aR	OEZ	OPT 22/2	1
FU9	Pojistkový odpojovač, 32 A aR	OEZ	OPT 22/3	1
KM8	DC magnetický stykač	ABB	GA 75-10	1
KM9	DC magnetický stykač	ABB	GA 75-11	1
FU7/+, FU7/-	Pojistka 125 A aR	OEZ	P40U10S	2
FU2/+, FU2/-	Pojistka 125 A aR	OEZ	P40U10S	2
FU3/+, FU3/-	Pojistka 125 A aR	OEZ	P40U10S	2
FU4/+, FU4/-	Pojistka 125 A aR	OEZ	P40U10S	2
-	Návěstní kontakt	OEZ	VL41 F	8

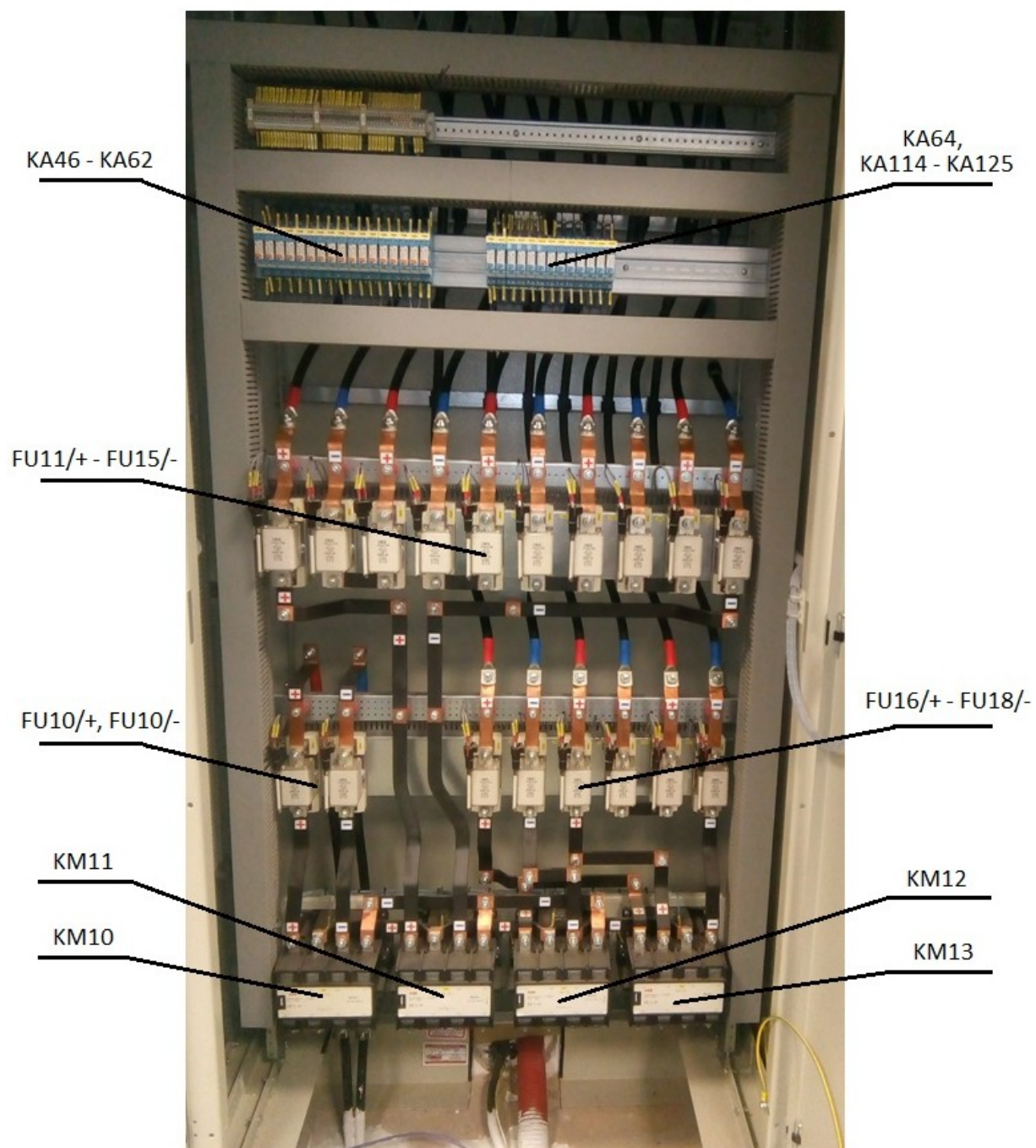


Obr. 2a – Vnitřní uspořádání rozvaděče +70 BIS – 2

+70 BJS – 3

Tab. 4a – Vybavení rozvaděče +70BJS – 3

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
KA46 - KA62	Relé 230 V AC, 8A + patice	FINDER	46.52.8.230.0040	17
KA64	Relé 24 V DC, 8A + patice	FINDER	46.52.9.024.0040	1
KA114 - KA125	Relé 24 V DC, 8A + patice	FINDER	46.52.9.024.0040	12
FU11/+ - FU15/-	Pojistka 250 A, aR	OEZ	P40U10S	10
FU10/+ - FU10/-	Pojistka 250 A, aR	OEZ	P40U10S	2
FU16/+ - FU18/-	Pojistka 250 A, aR	OEZ	P40U10S	6
KM10	Čtyřpólový stykač 350 A	ABB	EK210, SK 825 441	1
KM11	Čtyřpólový stykač 300 A	ABB	EK175, SK 825 440	1
KM12	Čtyřpólový stykač 300 A	ABB	EK175, SK 825 440	1
KM13	Čtyřpólový stykač 300 A	ABB	EK175, SK 825 440	1



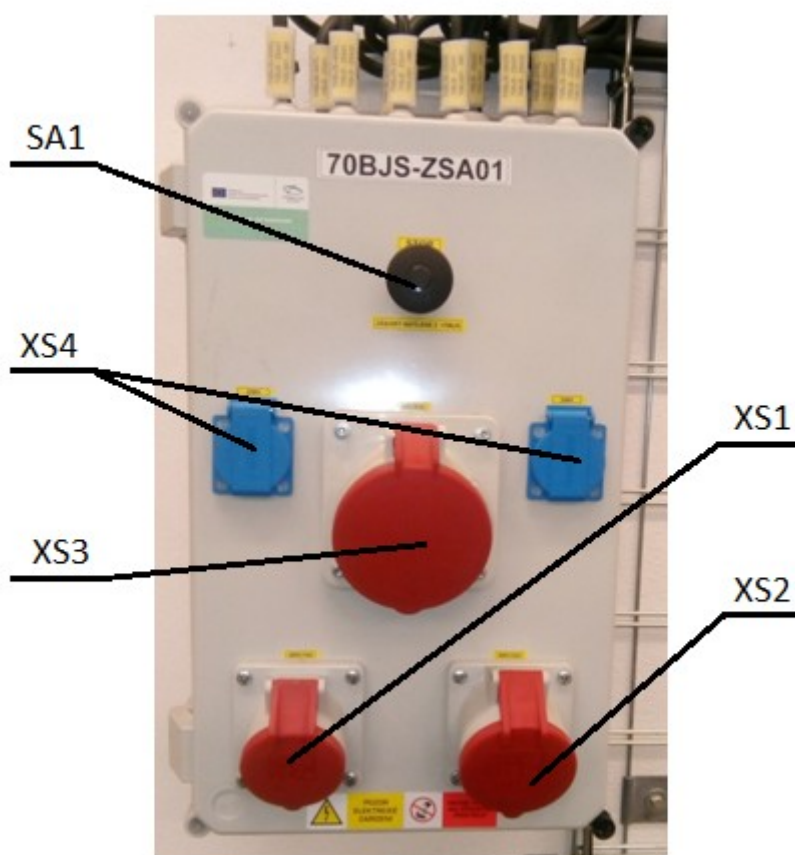
Obr. 3a – Vnitřní uspořádání rozvaděče +70 BJS – 3

70BJS – ZSA01 (-ZSA02)

Zásuvkové skříně 70BJS – ZSA01 a 70BJS – ZSA02 jsou identické. Napájeno z rozvaděče +70BJS.

Tab. 5a – Vybavení zásuvkové skříně 70BJS – ZSA01

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
XS1	Zásuvka trojfázová 400 V/16 A	-	-	1
XS2	Zásuvka trojfázová 400 V/32 A	-	-	1
XS3	Zásuvka trojfázová 400 V/63 A	-	-	1
XS4	Zásuvka jednofázová 230 V	-	-	2
SA1	STOP tlačítko	-	-	1



Obr. 4a - Uspořádání zásuvek na skříně 70BJS – ZSA01

70BJS – MX1 (- MX2,- MX3)

Svorkové skříně 70BJS – MX1, 70BJS – MX2 a 70BJS – MX3 jsou vybaveny z vnější strany tlačítkem.

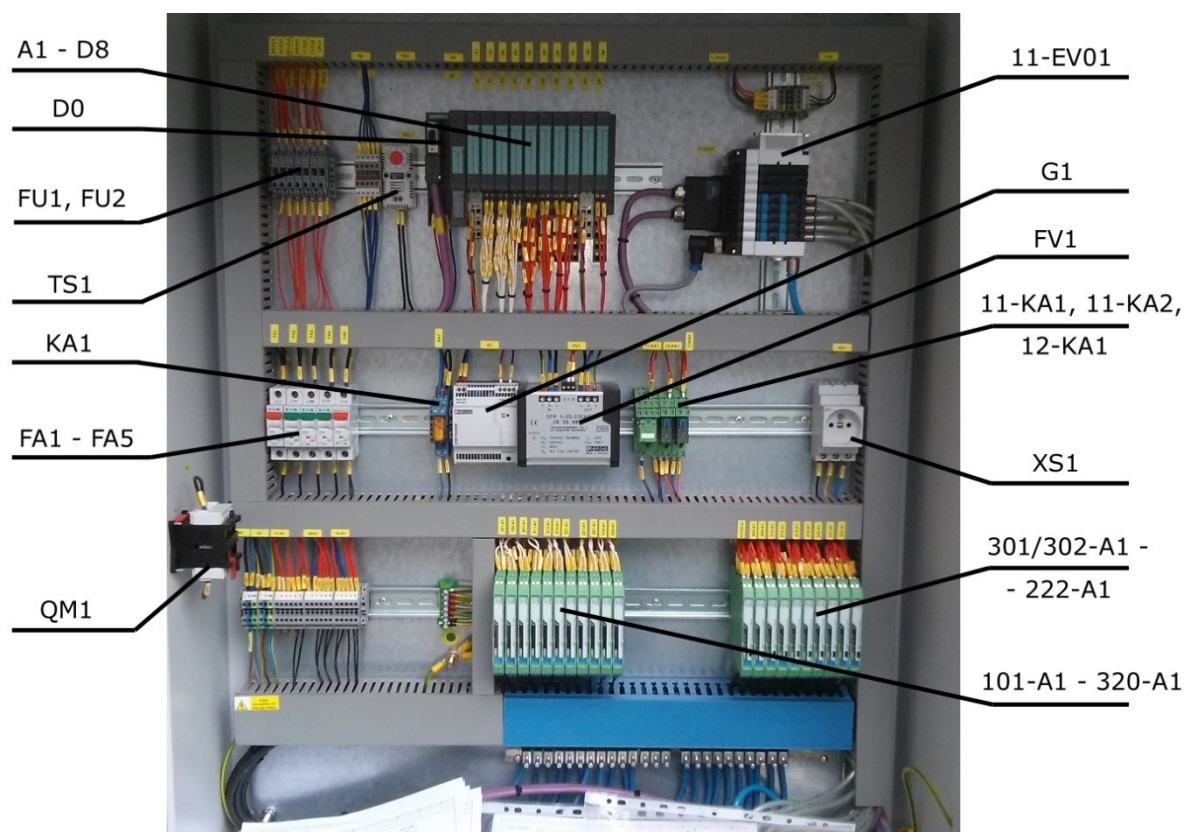


Obr. 5a – Svorkové skříně

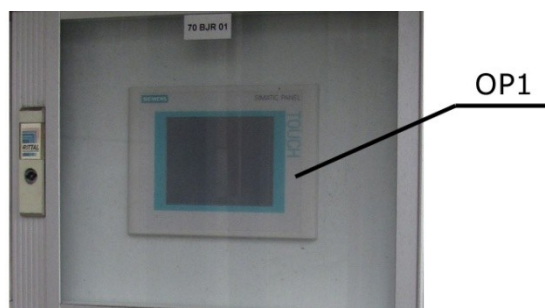
70 BJR 01 (CU101)

Tab. 6a – Vybavení rozvaděče 70 BJR 01 (CU101)

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
D0-FU1, A1-FU1	Pojistka 1 A	-	-	2
OP1-FU1	Pojistka 0,5 A	-	-	1
A2-FU1	Pojistka 2 A	-	-	1
11-FU1	Pojistka 0,5 A	-	-	1
11-FU2	Pojistka 2,5 A	-	-	1
12-FU1	Pojistka 1 A	-	-	1
D0	ET200S IM151-1	SIEMENS	ET200S IM151-1	1
A1, A2	PM-E 24V DC	SIEMENS	PM-E 24V DC	2
D1 - D3	4AI	SIEMENS	-	3
D4 - D7	8DI	SIEMENS	-	4
D8	8DO	SIEMENS	-	1
QM1	Hlavní vypínač (20 A)	-	-	1
FA1, FA5	Jistič jednofázový 10 A	EATON, Moeller	PL7 - B10/1	2
FA2, FA3	Jistič jednofázový 6 A	EATON	PL7 - B6/1	2
FA4	Jistič jednofázový 6 A	EATON	PL7 - C6/1	1
G1	Napájecí zdroj	Phoenix	STEP-PS/ 1AC/24DC/2.5A	1
FV1	Přístrojová ochrana	Phoenix	SFP 1-20/230AC	1
11-KA1, 12-KA1	Relé 24 V, 2x8 A	Phoenix	2987943	2
KA1	Relé	Finder	Type 40.52, 230 V	2
XS1	Zásuvka	OEZ	-	1
TS1	Termostat	Schneider	NSYCC0THC, 250 V, 10 A	1
301/302 - A2 – – 222 - A1	Oddělovací spínací zesilovač	Phoenix	MACX MCR-EX-SL-2NAM-RO	10
101 - A1 – – 320 - A1	Oddělovací spínací zesilovač	Phoenix	MACX MCR-EX-SL-RPSSI-I	11
11 – EV01	Rozdělovací ventil (terminál)	Festo	CPV10-VI 18200, CPV10-DI01-8, FBS-SUB-9-GS-DP-B	1
OP1	Dotykový panel SIMATIC	SIEMENS	TP177B	1



Obr. 6a – Vnitřní uspořádání rozvaděče 70 BJR 01 (CU101)

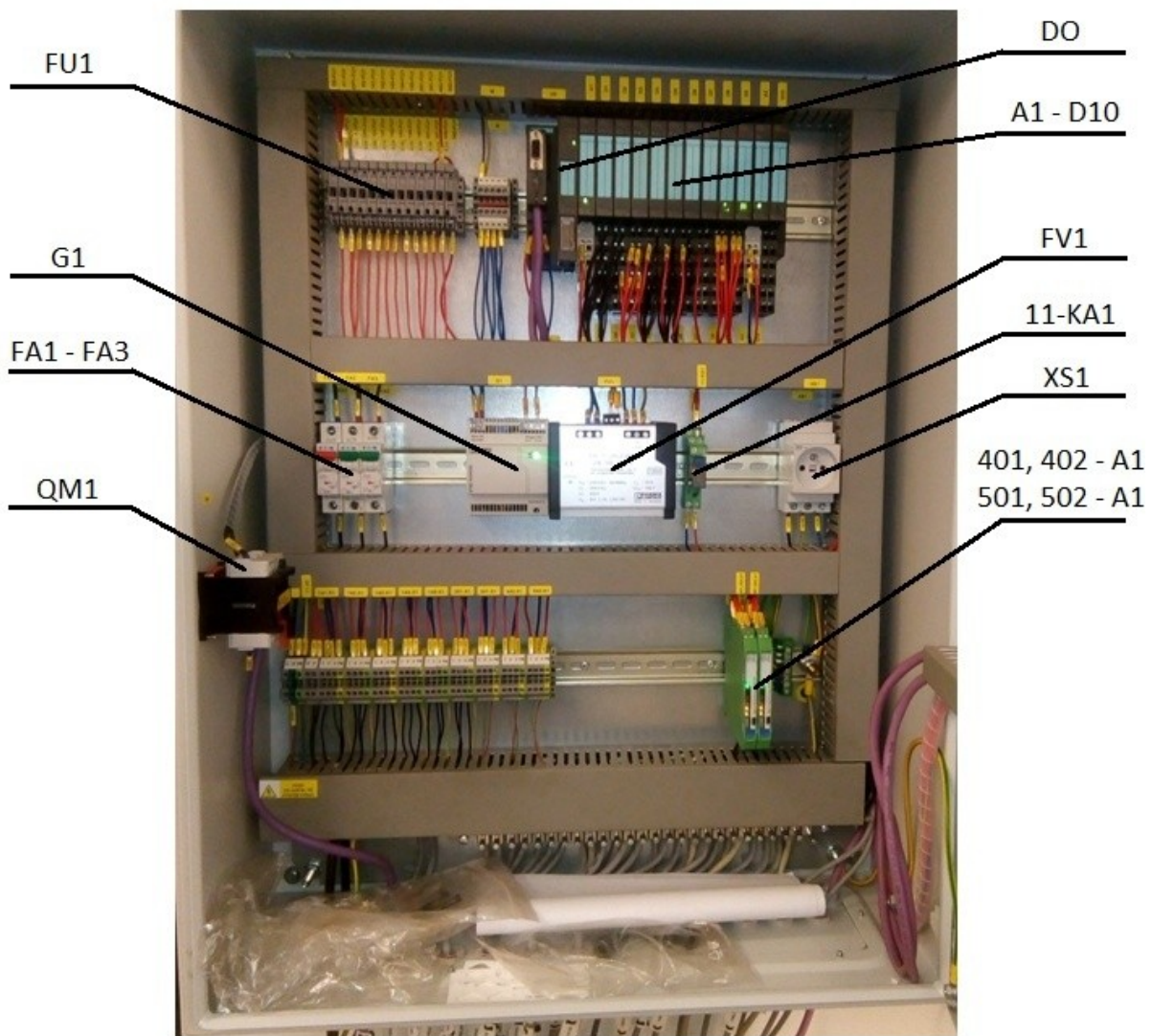


Obr. 7a – Dotykový panel na dveřích rozvaděče 70 BJR 01 (CU101)

70 BJR 02 (CU102)

Tab. 7a – Vybavení rozvaděče 70 BJR 02 (CU102)

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
D0-FU1, A1-FU1	Pojistka 1 A	-	-	2
OP1-FU1	Pojistka 0,5 A	-	-	1
A2-FU1	Pojistka 2,5 A	-	-	1
141-FU1 - 542-FU1	Pojistka 0,1 A	-	-	8
D0	ET200S IM151-1	SIEMENS	ET200S IM151-1	1
A1, A2	PM-E 24V DC	SIEMENS	PM-E 24V DC	2
D1 - D7	4AI	SIEMENS	-	7
D8, D9	8DI	SIEMENS	-	8
D10	8DO	SIEMENS	-	1
QM1	Hlavní vypínač	-	-	1
FA1	Jistič jednofázový 10 A	EATON	PL7 - B10/1	1
FA2	Jistič jednofázový 6 A	EATON	PL7 - B6/2	1
FA3	Jistič jednofázový 6 A	EATON	PL7 - C6/3	1
G1	Napájecí zdroj	Phoenix	STEP-PS/ 1AC/24DC/2.5A	1
FV1	Přístrojová ochrana	Phoenix	SFP 1-20/230AC	1
11-KA1	Relé 24 V, 2x8 A	Phoenix	2987943	1
XS1	Zásuvka	OEZ	-	1
401, 402-A1	Oddělovací spínací zesilovač	Phoenix	MACX MCR-EX-SL-2NAM-RO	2
501, 502-A1				
OP1	Dotykový panel SIMATIC	SIEMENS	TP177B	1



Obr. 8a – Vnitřní uspořádání rozvaděče 70 BJR 02 (CU102)

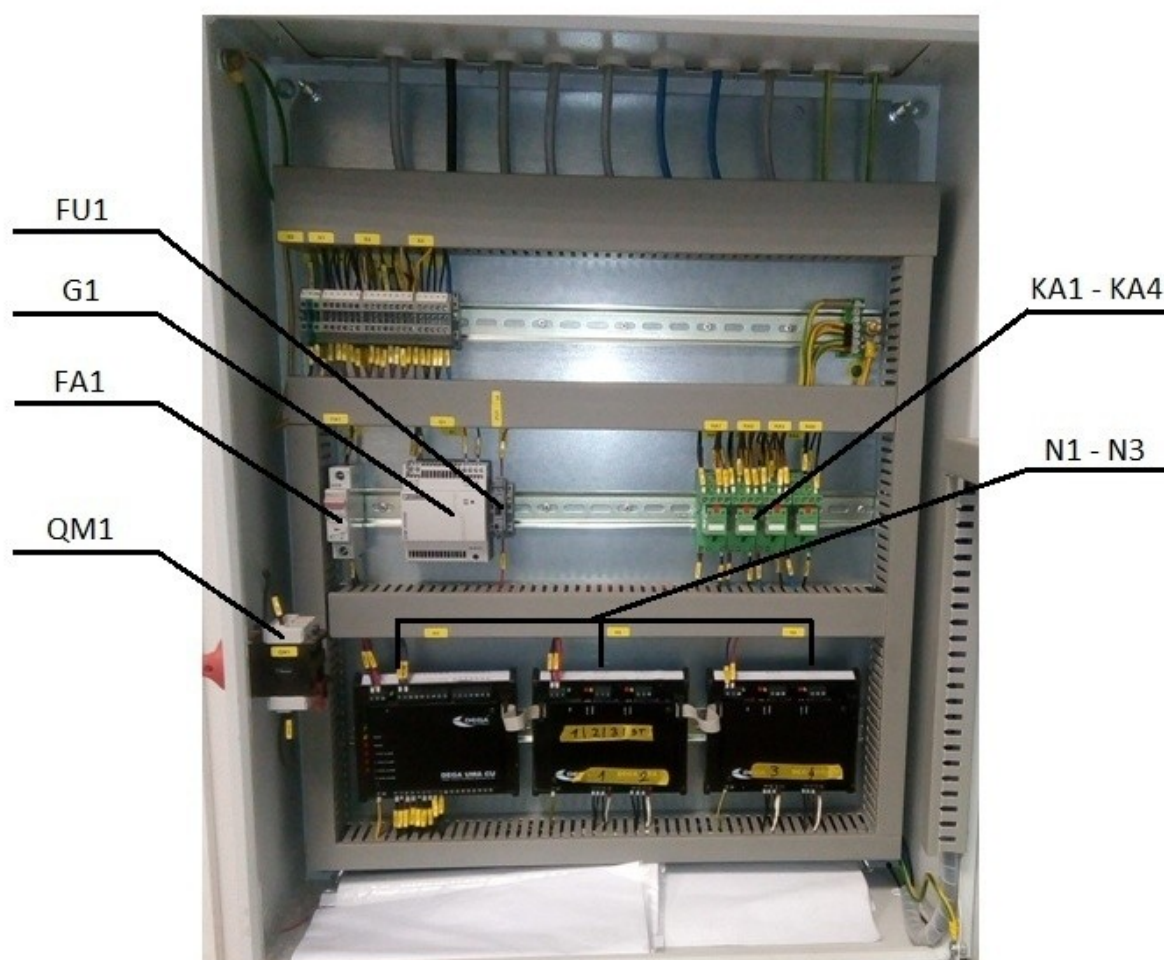


Obr. 9a – Dotykový panel na dveřích rozvaděče 70 BJR 02 (CU102)

70 BJR 03 (CU103)

Tab. 8a – Vybavení rozvaděče 70 BJR 03 (CU103)

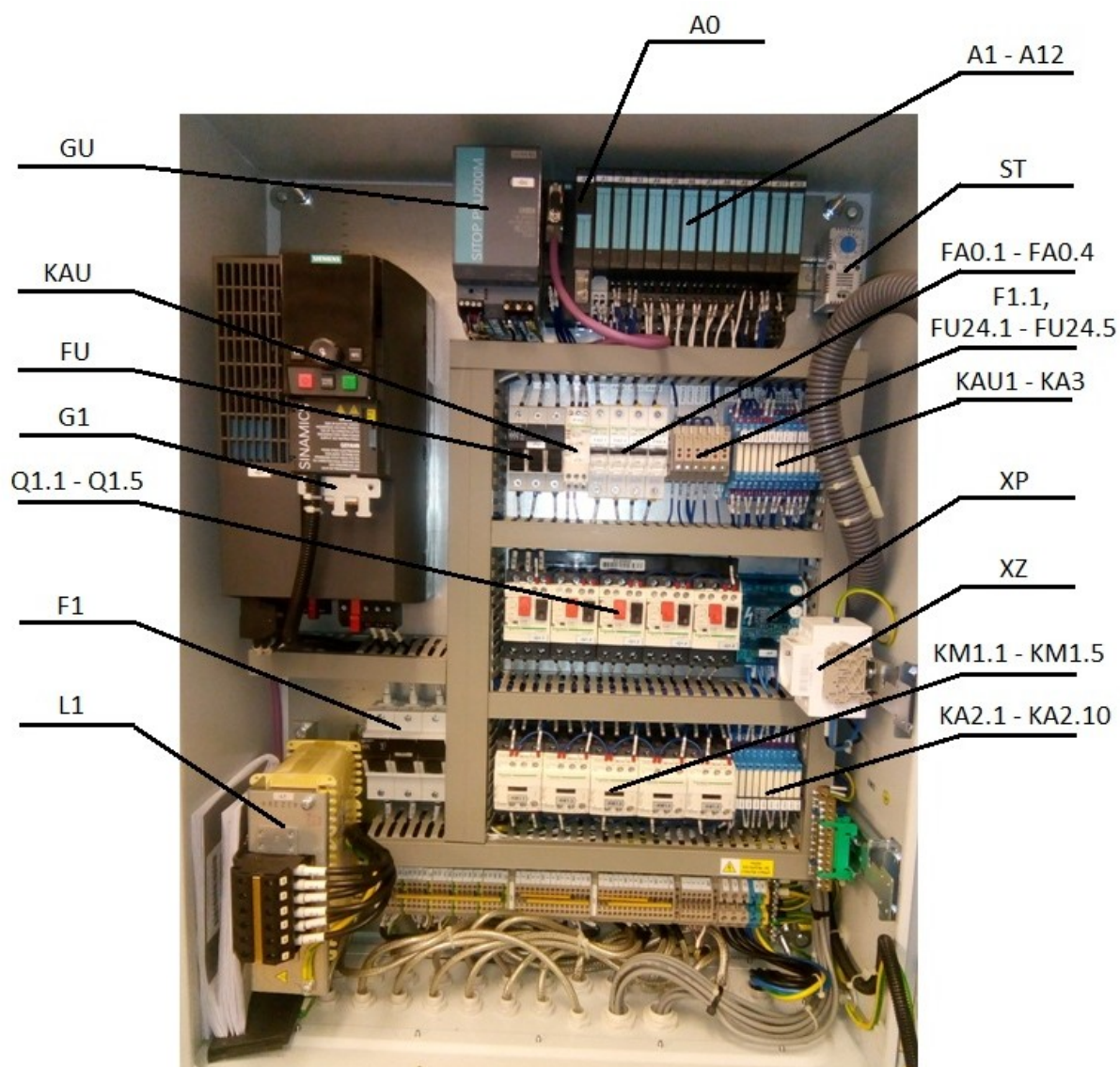
Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
FA1	Jistič jednofázový	Moeller	PL7-B2/1	1
G1	Napájecí zdroj	Phoenix	STEP-PS/ 1AC/12DC/5A	1
FU1	Pojistka 1A	-	-	1
KA1 - KA4	Relé 250 V AC, 4x5 A	Phoenix	2834148	4
QM1	Hlavní vypínač	-	-	1
N1 - N3	Modul vstupní ústředny detekce plynů	DEGA	-	3



Obr. 10a – Vnitřní uspořádání rozvaděče 70 BJR 03 (CU103)

+RM1**Tab. 9a – Vybavení rozvaděče +RM1**

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
GU	Napájecí zdroj 24V	SIEMENS	PSU200M	1
A0	ET200S IM151-1	SIEMENS	ET200S IM151-1	1
A1	PM-E 24V DC	SIEMENS	PM-E 24V DC	2
A2	8DI DC 24 V	SIEMENS	-	1
A3	8DO DC 24V/0,5 A	SIEMENS	-	1
A4 - A9	2AI ST	SIEMENS	-	6
A10	2AO	SIEMENS	-	1
A11	8DO	SIEMENS	-	1
A12	2AI	SIEMENS	-	1
ST	Teplotní čidlo	-	-	1
G1	Frekvenční měnič SINAMICS G120C, 11 kW	SIEMENS	6SL3210-1KE23-2AB1	1
FU	Pojistkový odpínač 32 A	OEZ	OPVP 10-3-S	1
KAU	Kontrolní relé	Schneider	RM4TR	1
FA0.1	Jistič jednofázový 16 A	Schneider	iC60H B16	1
FA0.2	Jistič jednofázový 4 A	Schneider	iC60H C4	1
FA0.3	Jistič jednofázový 6 A	Schneider	iC60H B6	1
FA0.4	Jistič jednofázový 10 A	Schneider	iC60H B10	1
FU24.1 - FU24.5	Pojistka	-	-	5
F1.1	Pojistka	-	-	1
KAU1 - KAU4	Relé	-	-	4
KA1 - KA3	Relé	-	-	3
KA1.1 - KA1.5	Relé	-	-	5
Q1.1 - Q1.5	Motorový spouštěč	Schneider	GV2ME10	4
XP	Rozvodný blok	-	TD80/10	1
YZ	Zásuvka	-	-	1
F1	Pojistkový odpojovač	OEZ	-	1
KM1.1 - KM1.5	Stykač	Schneider	LC1D09BD	4
KA2.1 - KA2.10	Relé	-	-	10
L1	Trojfázová tlumivka, 47 A	SIEMENS	A5E03308112	1

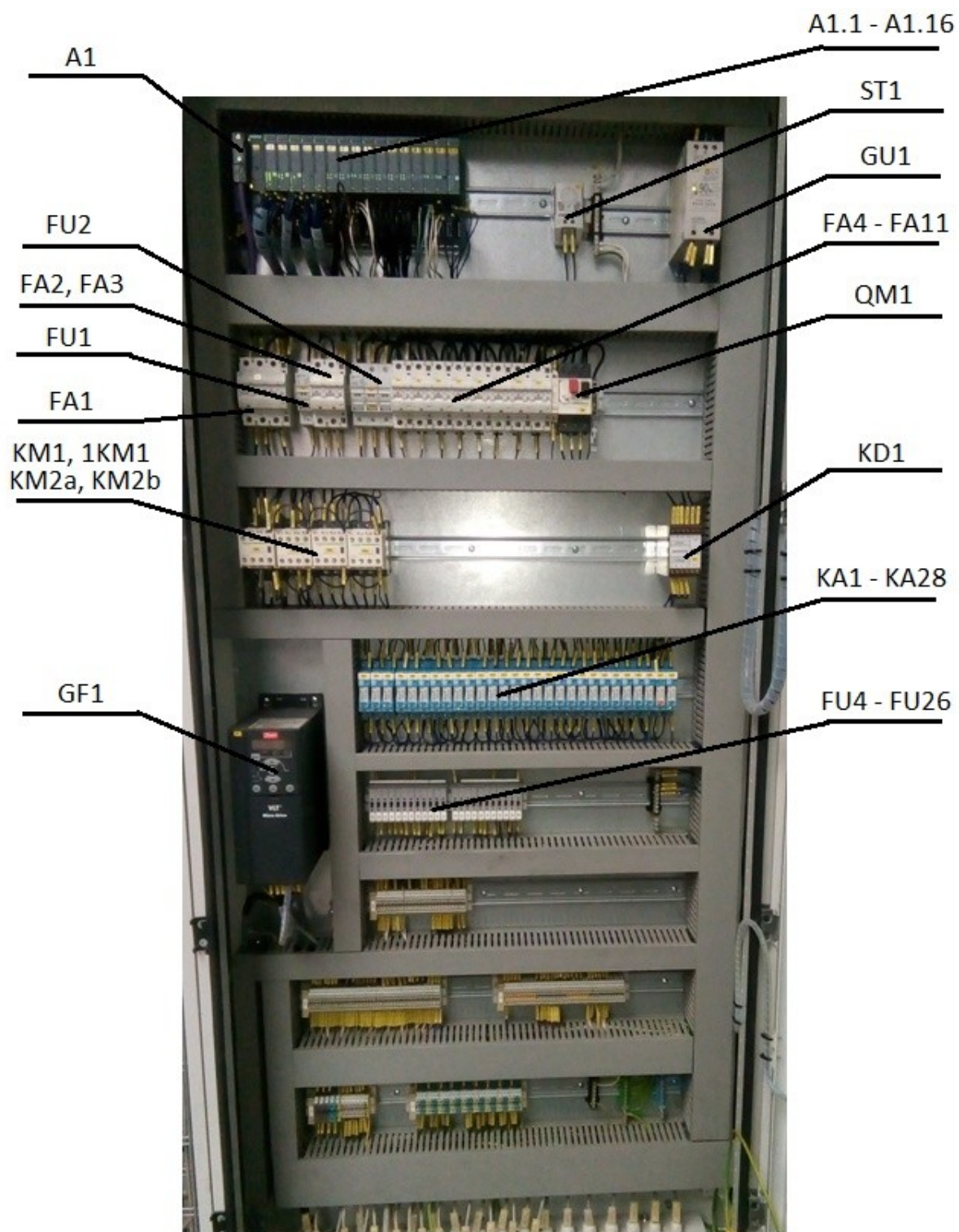


Obr. 11a – Vnitřní uspořádání rozvaděče +RM1

81 BHA 01

Tab. 10a – Vybavení rozvaděče 81 BHA 01

Označení:	Popis:	Výrobce:	Typ:	Počet:
A1	ET200SP	SIEMENS	ET200SP	1
A1.1 - A1.3	DI	SIEMENS	-	3
A1.4 - A1.5	DQ	SIEMENS	-	2
A1.6 - A1.14	AI	SIEMENS	-	9
A1.15	AQ	SIEMENS	-	1
A1.16	DI	SIEMENS	-	1
ST1	Teplotní čidlo	-	-	1
GU1	Napájecí zdroj 24 V, 90 W	-	PS5R-SE24	1
FA1	Jistič trojfázový 20 A	OEZ	LPN B20	1
FU1	Pojistkový odpínač, 10A gG	OEZ	OPVA10-1	1
FA2, FA3	Jistič jednofázový 4 A	OEZ	LPN C4	2
FU2	Pojistkový odpínač, 16 A gG	OEZ	OPVA10-3	1
FA4 - FA 8	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPN C6	5
FA9, FA10	Jistič jednofázový 4 A	OEZ	LPN C4	2
FA11	Jistič jednofázový 6 A	OEZ	LPN C 6	1
QM1	Motorový spouštěč	Schneider		1
KM1, 1KM1, KM2a, KM2b	Stykač + blok pomocných kontaktů	Schneider	LADN22	4
FU4 - FU26	Pojistky (100 mA - 2A)	-	-	23
GF1	Frekvenční měnič, 4 kW	Danfoss	FC-051	1
KD1	Invertor	-	-	1



Obr. 12a – Vnitřní uspořádání rozvaděče 81 BHA 01

Příloha B: Katalogové informace k pojiskám P40U10

OEZ

Pojistky pro jistění polovodičů

POJISTKOVÉ VLOŽKY PRO JISTĚNÍ POLOVODIČŮ DO 1000 V a.c. (SE ŠROUBOVÝMI SPOJI)



Pojistkové vložky pro jistění polovodičů typu P40U10, P50U10 a P50V10 jsou určeny pro jistění polovodičů a zařízení zvláště citlivých na zkrat. Pojistky P50... pak představují novou generaci se zvláště nízkými hodnotami I_{pt} .

- Mimořádně nízké hodnoty I_{pt} a omezených proudů.
- Malé rozměry a nízké ztráty.
- Možnost dálkové signalizace stavu pojistky - viz str. H29.
- Pojistka s označením P.U10S je vybavena signalizací S42.
- Možnost použití pojistkových držáků HS P50... str. H31.
- Možnost paralelního řazení pojistek - viz str. H33.
- Pojistkové vložky neobsahují škodlivé látky dle nařízení RoHS (kadmium, olovo a ostatní).
- Charakteristika gR pro jistění polovodičových prvků před přetížením a zkratem.
- Charakteristika aR pro jistění polovodičových prvků pouze před zkratem.
- Připojovací průřez podle ČSN 354701-4, IEC 60269-4 (proudová hustota $1 \pm 1,6 \text{ A/mm}^2$ min. 500 mm z každé strany pojistkové vložky).

Pojistkové vložky pro jistění polovodičů

I _n [A]	Bez signalizace		Se signalizací S42		Ztráty [W]	Oteplení [K]	I _{pt} celkový [A ² s]	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
	Typ	Kód výrobku	Typ	Kód výrobku					
P40U10	32 P40U10 32A gR	09013	P40U10S 32A gR	11835	9,0	32	4 500	0,540	3
	40 P40U10 40A gR	09014	P40U10S 40A gR	11834	13,0	35	6 000	0,540	3
	50 P40U10 50A gR	09015	P40U10S 50A gR	11833	18,0	45	8 000	0,540	3
	63 P40U10 63A gR	09016	P40U10S 63A gR	11832	25,0	62	9 000	0,540	3
	80 P40U10 80A aR	06548	P40U10S 80A aR	06549	30,0	63	12 000	0,540	3
	100 P40U10 100A aR	13501	P40U10S 100A aR	06550	39,0	72	15 000	0,540	3
	125 P40U10 125A aR	06551	P40U10S 125A aR	06552	36,0	63	25 000	0,540	3
	160 P40U10 160A aR	06553	P40U10S 160A aR	06554	50,0	83	33 000	0,540	3
	200 P40U10 200A aR	06555	P40U10S 200A aR	06556	58,5	85	55 000	0,540	3
	250 P40U10 250A aR	06557	P40U10S 250A aR	06558	68,0	91	105 000	0,540	3
	315 P40U10 315A aR	06559	P40U10S 315A aR	06560	76,5	94	210 000	0,540	3
	350 P40U10 350A aR	11245	P40U10S 350A aR	13749	82,0	96	250 000	0,540	3
	400 P40U10 400A aR	06561	P40U10S 400A aR	06562	99,5	105	280 000	0,540	3
	450 P50U10 400A aR	08677	P50U10S 400A aR	20519	80,0	90	260 000	0,540	3
	450 P50U10 450A aR	08657	P50U10S 450A aR	08680	90,0	98	400 000	0,540	3
P50U10	500 P50U10 500A aR	08654	P50U10S 500A aR	08681	105,0	100	580 000	0,540	3
	550 P50U10 550A aR	08655	P50U10S 550A aR	17515	112,0	107	750 000	0,540	3
	630 P50U10 630A aR	08656	P50U10S 630A aR	08571	127,0	110	850 000	0,540	3
	700 P50V10 700A aR	08682	P50V10S 700A aR	08683	125,0	112	1 100 000	0,720	3

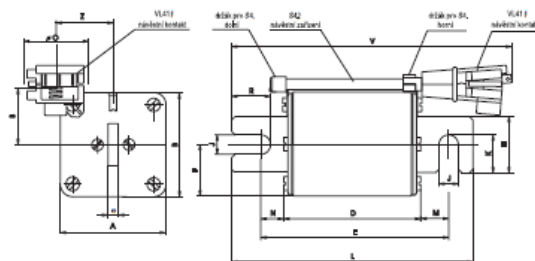
Parametry

Typ	P40U10	P50U10	P50V10
Velikost/připojovací rozteč	1/110 mm (1/130 mm na dotaz)	1/110 mm	2/110 mm
Jmenovitá napětí	U _n 1000 V a.c., 600 V d.c.	1000 V a.c./600 V d.c.	1000 V a.c./600 V d.c.
Jmenovitá vypínací schopnost (efektivní hodnota)	I _n 1000 V a.c. 100 kA 600 V d.c. 50 kA	1000 V a.c. > 60 kA	
Signalizace	dálková signalizace typ S (doplnit do označení ...S) pro návěštní kontakt VL41F		
Jmenovitá kmitočet	f _n 50 Hz		
Normy	IEC 60269-1, -4; ČSN EN 60269-1, -4; EN 60269		

Certifikační značky



Rozměry



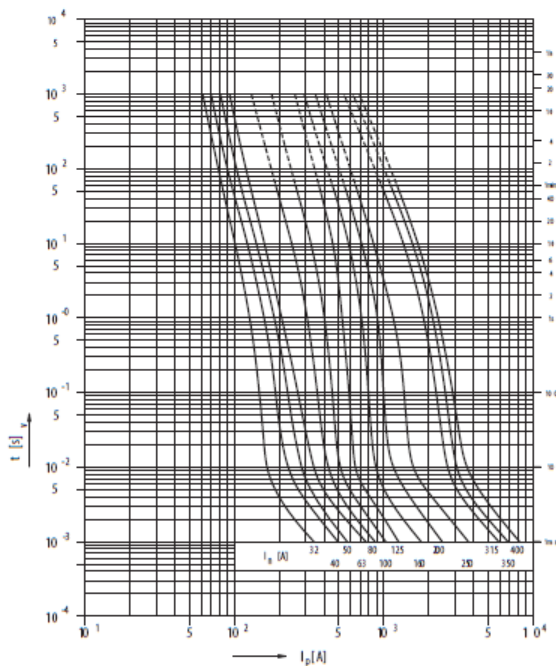
Typ	A	B	D	E	F	H	J	K	L	M	N	R	e	V	ø0	S	Z
	[mm]																
P40U10	52	52	78,4	106,6	26	25	11	18	137	15,7	12,5	22,3	6	160	36,5	30	30
P40U10 (DIN 130)	52	52	78,4	126,6	26	25	11	18	157	25,7	12,5	22,3	6	170	36,5	30	30
P50U10	52	52	78,4	106,6	26	25	11	18	137	15,7	12,5	22,3	6	160	36,5	30	30
P50V10	60	60	78,4	105,6	30	32	11	21,5	137	15,1	12,1	22,1	6	160	36,5	33	33

H22

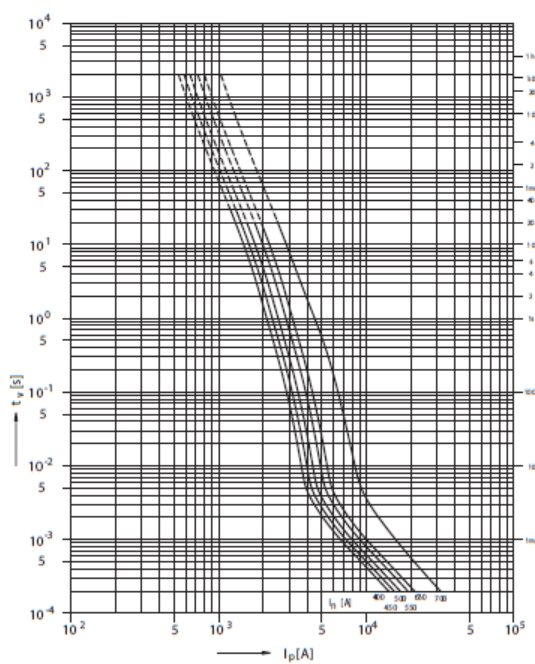
POJISTKOVÉ VLOŽKY PRO JIŠTĚNÍ POLOVODIČŮ DO 1000 V a.c. (SE ŠROUBOVÝMI SPOJI)

Charakteristiky

Tavná ampérsekundová charakteristika
P40U10gR, aR

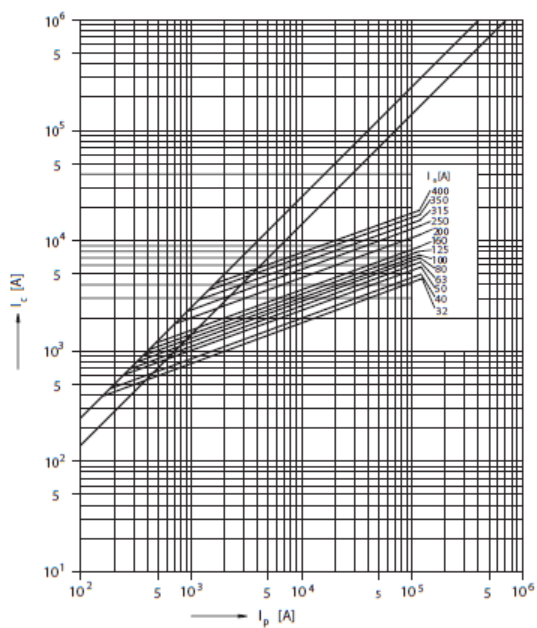


Tavná ampérsekundová charakteristika
P50U10, P50V10 aR



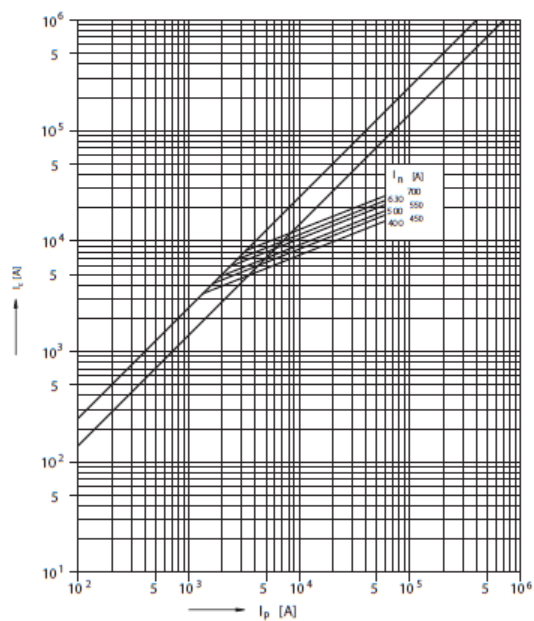
Ňmezovací charakteristika
P40U10 gR, aR

~ 1000 V
 $\cos \varphi = 0,1-0,3$



Ňmezovací charakteristika
P50U10, P50V10 aR

~ 1000 V
 $\cos \varphi = 0,1-0,3$



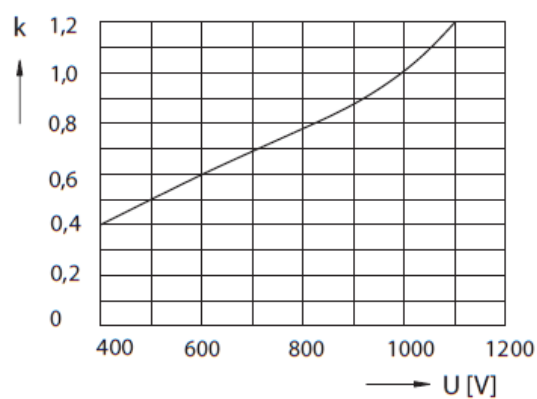
POJISTKOVÉ VLOŽKY PRO JIŠTĚNÍ POLOVODIČŮ DO 1000 V a.c. (SE ŠROUBOVÝMI SPOJI)

Charakteristiky

Koeficient, k' závislosti I_{pt} na provozním napětí U

$$(I_{pt_{eff}}) = kx I_{rat}$$

P40U10



Závislost přepětí na provozním napětí

P40U10

